This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

RECUEIL

DES

TRAVAUX SCIENTIFIQUES

DE M. ÉBELMEN.

L'Éditeur de cet ouvrage se réserve le droit de le traduire ou de le faire traduire en toutes langues. Il poursuivra, en vertu des Lois, Décrets et Traités internationaux, toutes contrefaçons, soit du texte, soit des gravures, ou toutes traductions faites au mépris de ses droits.

Le dépôt légal de cet ouvrage a été fait à Paris dans le cours du mois d'août 1855, et toutes les formalités prescrites par les Traités sont remplies dans les divers États avec lesquels la France a conclu des conventions littéraires.

Tout exemplaire du présent ouvrage qui ne porterait pas, comme ci-dessous, la griffe du Libraire-Éditeur, sera réputé contrefait. Les mesures nécessaires seront prises pour atteindre, conformément à la loi, les fabricants et les débitants de ces exemplaires.

Mallet-Bachelier

PARIS. — IMPRIMERIE DE MALLET-BACHELIER,
rue du Jardinet, n° 12.

RECUEIL

DES

TRAVAUX SCIENTIFIQUES

DE M. ÉBELMEN,

Ingénieur en chef au Corps impérial des Mines, Professeur de Docimasie à l'École des Mines de Paris,
Administrateur de la Manufacture impériale de Porcelaine de Sèvres,
Membre de la Commission française à Londres en 1851;

REVU ET CORRIGÉ

PAR M. SALVÉTAT,
Chimiste de la Manufacture impériale de Porcelaine de Sèvres,
Professeur à l'École centrale des Arts et Manufactures,
Membre suppléant dans la Commission française pour l'Exposition universelle de Londres,
Membre titulaire du Jury à l'Exposition universelle de Paris

PRÉCÉDÉ D'UNE

NOTICE SUR M. ÉBELMEN,

PAR M. E. CHEVREUL,
Membre de l'Institut.

TOME SECOND.

PARIS,
MALLET-BACHELIER, IMPRIMEUR-LIBRAIRE
DE L'ÉCOLE IMPÉRIALE POLYTECHNIQUE, DU BUREAU DES LONGITUDES,
Quai des Augustins, 55.
1855

(L'Éditeur de cet Ouvrage se réserve le droit de traduction)

198. a. 3.

TABLE SOMMAIRE DES MATIÈRES

CONTENUES DANS LE SECOND VOLUME.

Pages.

TROISIÈME PARTIE. — RECHERCHES DE GÉOLOGIE.

I. — Recherches sur les produits de la décomposition des minéraux de la famille des silicates. 1

II. — Recherches sur les produits de la décomposition des roches composées. 56

III. — Recherches sur les altérations des roches stratifiées par les agents atmosphériques et les eaux d'infiltration... 79

QUATRIÈME PARTIE. — RECHERCHES DE MÉTALLURGIE.

PREMIÈRE DIVISION. — *Carbonisation du bois et de la houille.*

I. — Notice sur quelques expériences faites sur la distillation du bois. 101

II. — Recherches sur la carbonisation du bois..... 104

III. — Notice sur une expérience relative à la carbonisation du bois en meules..... 129

IV. — Rapport sur les procédés de carbonisation employés par M. Popelin-Ducarre pour la fabrication du charbon de Paris. 138

V. — Recherches sur la carbonisation de la houille et expériences sur la composition des gaz qui se dégagent des fours à coke..... 142

Pages.

DEUXIÈME DIVISION. — *Métallurgie du fer.*

I. — Recherches sur la chaleur de combustion du carbone et de l'oxyde de carbone..... 156

II. — Notice sur des expériences relatives à l'emploi du bois en nature dans les hauts fourneaux..... 158

III. — Essai sur la réduction des minerais de fer dans les hauts fourneaux..... 185

IV. — Recherches sur la composition des gaz des hauts fourneaux et sur le parti qu'on en peut tirer comme combustible. (*Premier Mémoire.*)..... 224

V. — Recherches sur la composition des gaz des hauts fourneaux. (*Deuxième Mémoire.*)..... 258

VI. — Recherches sur la composition des gaz des hauts fourneaux. (*Troisième Mémoire.*)..... 336

VII. — Nouvelles recherches sur la composition des gaz des hauts fourneaux, et sur la théorie de ces appareils. (*Quatrième Mémoire.*)..... 395

VIII. — Recherches sur l'emploi des gaz comme combustible..... 436

IX. — Recherches sur la production et l'emploi des gaz combustibles dans les arts métallurgiques. (*Premier Mémoire.*) 463

X. — Recherches sur la production et l'emploi des gaz combustibles dans les arts métallurgiques. (*Deuxième Mémoire.*)..... 514

XI. — Appendice aux Mémoires précédents. Notice sur les générateurs de gaz des usines d'Audincourt..... 522

XII. — Note sur les procédés de M. Sire pour la fabrication du fer au moyen des gaz des hauts fourneaux,..... 540

XIII. — Recherches sur la composition des gaz qui se dégagent des foyers d'affinerie..... 548

Pages

TROISIÈME DIVISION. — *Chauffage des locomotives.*

I. — Expériences sur l'air des cheminées des fours à puddler et des fours à réchauffer..... 585

II. — Recherches sur la combustion du coke dans les foyers des machines locomotives; composition des gaz qui s'échappent de ces foyers..... 598

TABLE ALPHABÉTIQUE ET RAISONNÉE DES MATIÈRES CONTENUES DANS LES DEUX VOLUMES..... 601

RECUEIL

DES

TRAVAUX SCIENTIFIQUES

DE

M. ÉBELMEN.

TROISIÈME PARTIE.

RECHERCHES DE GÉOLOGIE.

I.

Recherches sur les produits de la décomposition des espèces minérales de la famille des silicates.

Les produits de la décomposition des minéraux qui appartiennent à la famille des silicates ont été peu examinés jusqu'ici par les minéralogistes. Le seul fait acquis à la science est celui de la transformation des espèces feldspathiques en kaolin. Ce phénomène naturel s'est accompli et s'accomplit probablement encore tous les jours sur une grande échelle. Toutes les roches qui admettent une espèce feldspathique comme principe constituant, se présentent souvent dans un état plus ou moins avancé de décomposition, et l'on sait que ces roches forment à elles seules une partie considérable de l'écorce solide du globe. Mais l'élément feldspathique n'est pas le seul qui s'y trouve décom-

posé, et des silicates ne renfermant pas d'alcali s'y montrent aussi sujets à de profondes altérations. Les faits que j'ai rassemblés dans ce Mémoire ont eu surtout pour but d'éclaicir ce qui se passe dans le cas de la décomposition des silicates non alcalifères. Ils montreront, je l'espère, que la transformation du feldspath en kaolin n'est qu'un cas particulier de la décomposition des silicates sous l'influence des agents atmosphériques.

Rapport de ces recherches avec la géologie. — L'importance de cette étude, au point de vue purement géologique, me semble résulter des considérations suivantes.

Les géologues admettent généralement que les terrains stratifiés proviennent en grande partie de la destruction des terrains préexistants. Tout nous prouve que des masses énormes de roches ignées ont été entraînées par les eaux, et ont concouru par conséquent à produire les formations sédimentaires. Cette désagrégation des roches plutoniques a-t-elle été un phénomène purement mécanique, a-t-elle été précédée ou accompagnée d'une véritable décomposition des minéraux qui les constituaient?

Pour résoudre cette question, je ferai d'abord remarquer que l'état de décomposition d'une roche est en relation très-intime avec sa cohésion. Il est bien évident que des roches altérées seront désagrégées et entraînées par les eaux avec beaucoup plus de facilité que les autres. Les stries qu'on remarque sur les roches polies dans les Alpes, les Pyrénées, la Scandinavie, ne prouvent-elles pas que des roches non décomposables à l'air ne s'entament pas sensiblement pendant des milliers d'années?

En comparant, *d'une manière générale*, la composition chimique des roches ignées et des terrains stratifiés, on arrive à la même conclusion.

Les minéraux qu'on rencontre dans les roches d'origine ignée sont principalement la silice à l'état de quartz et des silicates complexes dont les bases sont la potasse et la

soude, l'alumine, la chaux et la magnésie, du fer et du manganèse ordinairement à l'état de protoxydes. Toutes les bases se trouvent ici dans le même état de combinaison.

Si nous examinons maintenant les formations sédimentaires, nous y retrouvons les mêmes éléments, mais les groupements moléculaires sont devenus beaucoup plus simples, et le mode de combinaison, au lieu d'être uniforme pour toutes les bases, comme dans les espèces minérales des terrains ignés, est essentiellement variable d'une base à l'autre, suivant l'énergie des affinités de chacune d'elles.

Ainsi, nous observons dans les terrains formés par voie aqueuse, la silice, soit à l'état de quartz comme dans les grès, les meulières, soit à l'état soluble dans les alcalis, comme dans la *gaise des Ardennes* (1).

L'alumine se trouve presque toujours en combinaison avec la silice et l'eau dans les argiles.

La chaux se présente quelquefois à l'état de sulfate, mais la proportion de ce sel est peu considérable par rapport à celle du carbonate que l'on rencontre quelquefois presque pur, plus ordinairement mélangé avec des proportions variables d'argile, dans les calcaires marneux et les marnes.

La magnésie se trouve ordinairement associée à la chaux à l'état de carbonate; quelquefois cependant on la rencontre en combinaison avec la silice dans certaines argiles.

On voit que la magnésie, par le rôle qu'elle joue dans la formation des terrains stratifiés, tient le milieu entre l'alumine et la chaux. Ses affinités la rangent aussi entre ces deux bases.

Le fer et le manganèse se trouvent ordinairement à l'état

(1) M. Sauvage a montré que des couches fort épaisses dans l'Oxford-clay et dans le terrain du grès vert des Ardennes étaient en grande partie composées de silice soluble dans les alcalis. Des recherches récentes faites au laboratoire de l'École des Mines sur des échantillons remis par M. d'Archiac ont montré qu'il en était de même pour un grand nombre de couches de la craie tufeau.

de suroxydes hydratés, mêlés ensemble en toutes proportions, mais isolés de toute combinaison avec la silice. Ces oxydes sont le plus souvent *mêlés* avec les groupes moléculaires formés par les autres bases, dans les grès, les argiles, les calcaires.

Quant aux alcalis, on ne les rencontre plus qu'en faible proportion dans les terrains formés par la voie aqueuse, et la solubilité de leurs composés rend bien raison de cette circonstance. On trouve cependant de la potasse en quantité fort notable dans certains terrains (grains verts des terrains néocomien, crétacé, tertiaire inférieur); les argiles en contiennent toutes des quantités appréciables. Le sel marin forme à lui seul, comme on sait, des couches et des amas considérables.

Les terrains stratifiés renferment donc tous les éléments des roches d'origine ignée, et, en outre, des acides qui n'existaient dans celle-ci qu'en faible proportion.

Si les terrains de sédiment avaient été produits par une simple désagrégation des roches d'origine ignée, il est évident que l'on retrouverait dans les roches arénacées, les argiles par exemple, les mêmes éléments que dans les premières, dans les mêmes proportions et le même état de combinaison. Or les argiles sont de véritables combinaisons, en proportions variables, de silice, d'alumine et d'eau, et elles possèdent des propriétés physiques et chimiques fort différentes de celles qui appartiennent aux silicates des roches ignées. Nous sommes donc en droit d'en conclure que la destruction de celles-ci a été accompagnée, dans la plupart des cas, de la décomposition des minéraux qui les constituaient.

Cette proposition acquerra encore une plus grande probabilité par les résultats des analyses que contient ce Mémoire. Si l'on généralise, en effet, les résultats que j'ai obtenus dans ces recherches, on trouvera que la décomposition des silicates complexes des roches plutoniques doit

conduire précisément, pour chacune des bases qu'ils contiennent, au mode de combinaison que avons rencontré dans les formations sédimentaires.

Presque tous les minéraux que j'ai pu examiner jusqu'ici présentent, sur le même échantillon, un passage incontestable et graduel entre le minéral intact et le minéral altéré. En analysant séparément les deux parties et comparant leur composition, j'ai pu reconnaître quels avaient été les éléments entraînés, dissous par le fait de la décomposition, et quelles modifications avaient subies les éléments restant en place.

Produits de la décomposition des silicates naturels.

J'ai examiné d'abord quelques silicates naturels dont la plupart appartiennent au groupe pyroxénique; ce sont :

1° Le bisilicate de manganèse venant d'Alger;

2° Le bisilicate de manganèse de Saint-Marcel;

3° La bustamite de la mine d'argent de Tetala (Mexique);

4° Le grenat mélanite de Beaujeux (Rhône).

J'ai analysé ensuite diverses roches basaltiques qui présentaient aussi un passage évident, sur le même échantillon, entre la roche intacte et la partie altérée.

Je vais indiquer ici, avec quelques détails, les résultats obtenus dans chaque cas, et je ferai ressortir ensuite les conséquences qui résulteront de leur comparaison.

1°. *Silicate de manganèse d'Alger.*

Ce minéral qu'on trouve en filons dans le terrain primitif des environs d'Alger, accompagne un minerai de manganèse que l'on commence à exploiter. L'échantillon qui m'a été remis par M. Renou, membre de la Commission scientifique d'Algérie, à qui l'on doit la découverte du minerai de manganèse, est formé de deux parties bien distinctes, l'une lamelleuse en trois sens et de couleur rose; l'autre, à la

surface du morceau exposée à l'air, est noire et terreuse sur une épaisseur de 7 à 8 millimètres, mais il est facile de saisir le passage entre ces deux matières. On voit, en effet, les lamelles roses se parsemer de points noirs, dans le voisinage de la partie altérée, et devenir enfin complétement noires, tout en conservant leur texture. Il est donc bien évident que la matière noire résulte d'une altération du minéral rose. J'ai séparé avec soin et soumis à l'analyse chacune des deux parties de l'échantillon.

α. Substance rose. — La densité de ce minéral est de 3,559. Il raye le verre. Sa texture est tantôt lamelleuse et tantôt grenue. Il fond, mais pas très-facilement, au chalumeau. Il ne fait pas d'effervescence avec les acides. L'acide chlorhydrique bouillant l'attaque lentement et avec difficulté avec dépôt de silice. J'ai reconnu dans la liqueur, par les procédés ordinaires, la présence des protoxydes de fer et de manganèse, de la chaux et de la magnésie.

Pour faire l'analyse de cette substance, j'en ai fait fondre 1gr,077 avec 4 grammes de carbonate de soude sec. La masse fondue a été traitée par l'acide chlorhydrique, et la silice séparée par les procédés ordinaires. Elle s'est dissoute en entier, après avoir été pesée, dans une solution faible de potasse. Le fer et le manganèse ont été précipités ensemble de la dissolution au moyen du sulfhydrate d'ammoniaque. Les sulfures séparés de la liqueur par filtration ont été redissous dans l'acide chlorhydrique concentré, auquel on a ajouté quelques gouttes d'acide nitrique pour peroxyder le fer, puis on a séparé le peroxyde de fer de l'oxyde de manganèse au moyen du succinate d'ammoniaque. Le manganèse a été dosé à l'état de protoxyde.

La liqueur dont on avait séparé le fer et le manganèse a été saturée par un acide, bouillie et filtrée pour séparer le soufre, puis saturée par de l'ammoniaque, et précipitée successivement par l'oxalate et le phosphate d'ammoniaque. La chaux a été dosée à l'état de sulfate. Voici les résultats

de l'analyse :

		Oxygène.		Rapport.
Silice	45,49	23,64		2
Protoxyde de manganèse	39,46	8,65		
Protoxyde de fer	6,42	1,46	12,44	1
Chaux	4,66	1,33		
Magnésie	2,60	1,00		
	98,63			

La matière rose est donc du bisilicate de manganèse (rhodonite de M. Beudant), ainsi que les caractères extérieurs l'indiquent. Une partie très-notable du protoxyde de manganèse s'y trouve remplacée par des bases isomorphes. La formule de ce minéral est par conséquent :

$$2\,(SiO),\ (MnO,\ CaO,\ FeO,\ MgO).$$

β. *Matière noire à la surface du silicate.* — Cette matière est friable; chauffée dans un tube fermé, elle donne de l'eau. L'acide chlorhydrique l'attaque aisément avec dégagement de chlore, en laissant un résidu de couleur rose.

Pour faire l'analyse de cette substance, j'en ai attaqué un gramme dans un petit ballon par de l'acide chlorhydrique bien pur (1), et j'ai reçu le chlore dans une solution bien claire d'acide sulfureux mêlée de chlorure de barium. J'ai cessé de faire bouillir l'acide aussitôt après la décoloration de la substance et l'expulsion complète du chlore hors du petit ballon, afin d'attaquer le moins possible la matière rose. La dissolution d'acide sulfureux bouillie, puis filtrée, a donné du sulfate de baryte, dont le poids a permis de calculer l'oxygène qui se trouvait dans le minéral essayé en sus du protoxyde.

La liqueur provenant du traitement de la matière noire par l'acide chlorhydrique a été filtrée, puis évaporée à siccité pour séparer quelques flocons de silice, et filtrée de

(1) L'acide chlorhydrique employé a été purifié par le chlore, le cuivre métallique et la distillation sur du sel marin, suivant le procédé que j'ai décrit t. 1er, p. 44.

nouveau. On a séparé dans la liqueur le manganèse, le fer et la chaux par les mêmes moyens que précédemment; on n'y a pas rencontré de magnésie.

Le résidu inattaqué dans l'acide chlorhydrique a été calciné et pesé, puis on a enlevé la silice gélatineuse par la potasse liquide. La partie insoluble dans l'alcali se composait de petits grains roses, qui, examinés à la loupe, paraissaient tout à fait identiques avec le bisilicate du centre de l'échantillon. Effectivement, en attaquant cette matière par du carbonate de soude au creuset de platine, j'en ai séparé ensuite par les acides les 0,48 de son poids de silice gélatineuse, nombre très-rapproché de celui qu'a fourni l'analyse du bisilicate.

Pour doser l'eau du minéral noir, j'ai chauffé une nouvelle quantité de ce corps dans l'hydrogène en me servant d'un creuset de platine à couvercle tubulé. J'ai obtenu une matière verdâtre que l'acide chlorhydrique attaquait sans dégagement de chlore. La perte du poids du minéral chauffé dans l'hydrogène se composait : 1° de l'eau du minéral; 2° de l'oxygène en sus de celui qui correspondait au protoxyde, lequel était connu par le poids du sulfate de baryte, en sorte que la différence avec la perte dans le courant d'hydrogène donnait l'eau. Voici les résultats de l'analyse :

			Oxygène.
Eau		10,14	9,02
Oxygène		8,94	8,94
Protoxyde de manganèse		43,00	9,43
Peroxyde de fer		6,60	2,00
Chaux		1,32	0,37
Résidu insoluble.	Silice gélatineuse	2,40	1,25
	Bisilicate non attaqué	27,20	»
		99,60	

Si l'on considère que le silicate rose est attaquable par l'ébullition avec l'acide chlorhydrique, on sera porté à admettre que la petite quantité de silice gélatineuse trouvée

dans l'analyse provient d'une certaine portion de bisilicate. En admettant cette supposition, et en retranchant de la quantité trouvée de protoxyde de manganèse celle qui correspond à la silice gélatineuse, et qui est 2,10, le reste, 40,90, renferme une quantité d'oxygène égale à celle trouvée par l'acide sulfureux. On peut en conclure que la matière noire est un mélange d'hydrates de peroxydes de manganèse et de fer avec une certaine proportion de bisilicate non altéré.

Si l'on compare maintenant cette composition à celle de la matière rose, on voit : 1° que la silice et la magnésie ont complétement disparu par le fait de la décomposition, ainsi que la majeure partie de la chaux ; 2° que les protoxydes de fer et de manganèse se sont transformés en hydrates de peroxyde, et se retrouvent dans la matière noire dans le même rapport que dans le minéral non altéré.

2°. *Silicate de manganèse de Saint-Marcel* (Piémont).

On trouve ce minéral en filons dans le terrain où l'on rencontre les nombreuses espèces de Saint-Marcel. Il m'a été remis par M. Bertrand de Lom. L'échantillon que j'ai examiné est formé à l'extérieur de bisilicate de manganèse lamelleux, dont l'aspect et les caractères minéralogiques sont tout à fait les mêmes que ceux du minéral d'Alger. L'extérieur est formé par une substance noire qui provient évidemment d'une altération de la matière rose, car on y voit des lamelles roses passer insensiblement au noir en se fondant au milieu de la masse altérée. J'ai remis à la collection de l'École des Mines un échantillon qui prouve le fait d'une manière incontestable.

J'ai analysé séparément la matière noire et la matière rose.

α. *Substance rose.* — La densité de ce minéral a été trouvée de 3,635 à 15° ; il s'attaque, mais difficilement, par l'acide chlorhydrique bouillant. L'analyse faite sur 1gr,319

par les mêmes moyens que ceux employés pour le minéral d'Alger, m'a donné :

		Oxygène.		Rapport.
Silice	46,37	23,093		2
Protoxyde de manganèse	47,38	10,395	11,957	1
Chaux	5,48	1,562		
	99,23			

Formule 2(Si O), (Mn O, Ca O).

β. *Substance noire.* — Cette matière présente encore en beaucoup de points la texture lamelleuse du centre de l'échantillon. Sa densité a été trouvée de 3,98 à 15 degrés.

Pour l'analyser, j'en ai traité 1gr,138 dans un petit ballon par l'acide chlorhydrique, et j'ai recueilli et dosé le chlore au moyen de l'acide sulfureux. L'attaque a été prolongée jusqu'à décoloration complète du résidu. La liqueur contenue dans le petit ballon a été filtrée, puis évaporée à siccité pour séparer quelques flocons de silice qui ont été recueillis et pesés. Dans la liqueur, on a trouvé du manganèse et de la chaux qui ont été précipités successivement par le sulfhydrate et l'oxalate d'ammoniaque. Le résidu inattaqué par l'acide chlorhydrique a été pesé, puis traité par une solution aqueuse de potasse pour dissoudre la silice libre qu'il contenait. Il est resté une poudre rose identique au silicate non altéré.

En résumé, j'ai trouvé dans l'analyse de la matière noire :

			Oxygène.	
Eau		1,10		
Oxygène		4,44	4,44	
Protoxyde de manganèse		44,71	10,33	(8,88 + 1,45)
Chaux		0,90	0,25	
Résidu insoluble	Silice gélatineuse	8,00	4,15	
	Bisilicate non attaqué	41,47	»	
		100,62		

D'après cette analyse, l'oxygène trouvé par l'acide sulfu-

reux ne serait pas suffisant pour transformer tout le protoxyde de manganèse en deutoxyde $Mn^2 O^3$. On peut en conclure avec certitude qu'une partie du protoxyde de manganèse dissous dans l'acide chlorhydrique provenait d'une certaine quantité de bisilicate. En admettant que le reste du manganèse dissous soit à l'état de deutoxyde, on trouve que 1,45 représente l'oxygène du protoxyde de manganèse provenant du bisilicate. En y ajoutant l'oxygène de la chaux qui est 0,25, on trouve 1,70 qui est à peu près la moitié de l'oxygène de la silice gélatineuse. On peut remarquer également que l'oxygène de la chaux se trouve avec l'oxygène du protoxyde de manganèse du silicate dans le même rapport que dans la matière non altérée. On pourrait donc représenter comme il suit le résultat de l'analyse qui précède :

Deutoxyde de manganèse ($Mn^2 O^3$).....	42,55
Bisilicate identique à α....	56,97
Eau.....	1,10
	100,62

Nous considérerons la matière noire comme un mélange intime de deutoxyde de manganèse (braunite) et de bisilicate non altéré. En admettant 4,81 pour la densité de la braunite, et 3,635, nombre trouvé plus haut, pour celle du bisilicate, la densité calculée du mélange devrait être 4,12. L'observation directe nous a donné un nombre un peu plus faible, 3,98.

On peut exprimer de la manière suivante les résultats de la décomposition du minéral de Saint-Marcel : la silice et la chaux ont disparu ; le protoxyde de manganèse s'est changé en deutoxyde ou braunite.

Ce résultat me paraît éclaircir singulièrement la question de l'origine et de la composition des matières que l'on désigne sous le nom de silicates noirs, de silicates de deutoxyde de manganèse. On a fait pendant longtemps une espèce à part, sous le nom de *marceline*, d'une substance

trouvée à Saint-Marcel, qui contenait du deutoxyde de manganèse et de la silice qu'on en séparait à l'état gélatineux par l'acide chlorhydrique. Mais la proportion de silice était loin d'être la même dans tous les échantillons. L'analyse de M. Berthier avait donné 15 pour 100, celle de M. Berzelius 26 pour 100 de silice. M. Haidinger avait reconnu, d'un autre côté, que les cristaux de marceline étaient identiques à ceux de braunite. M. Damour, dans un travail récent (1), a montré clairement que la marceline devait être considérée comme un mélange intime de braunite avec un silicate manganeux dont il n'a pas déterminé la formule. La substance noire qui se trouve à la surface du bisilicate de Saint-Marcel présente une composition analogue à celle de la marceline, et je crois qu'il convient d'attribuer la formation de celle-ci et des autres silicates noirs de manganèse à des causes analogues à celles qui ont produit la décomposition du bisilicate de manganèse. La présence de cristaux de braunite au milieu de la masse décomposée n'aurait rien de surprenant (2). En se changeant, en effet, en deutoxyde de manganèse, le bisilicate perd près de la moitié de son poids; d'un autre côté, sa densité s'accroît à mesure que la proportion de silice diminue. La matière en se décomposant doit donc prendre l'état terreux, ou bien se contracter de façon à occuper un volume beaucoup moindre que le volume primitif. On peut aisément concevoir que ce mouvement moléculaire, s'opérant pendant un temps très-long, donne naissance à des cristaux qui se produiront surtout dans l'intérieur des géodes formées à la suite de la contraction. Plusieurs autres substances cristallisées paraissent s'être produites d'une manière analogue dans l'intérieur des filons métallifères.

(1) *Annales des Mines*, tome I, p. 400, 4e série.

(2) Le bisilicate de Saint-Marcel se trouve dans les mêmes filons que la marceline, et quelques échantillons présentent, d'après M. Descloizeaux, qui a examiné le gisement de ces minéraux, du silicate rose au centre d'une masse de marceline en partie cristallisée sous les formes de la braunite.

3°. *Bustamite.*

La bustamite appartient par sa composition chimique au groupe des pyroxènes. On ne l'a rencontrée jusqu'à présent qu'au Mexique, où elle accompagne des minerais argentifères. Elle a été décrite par M. Brongniart (1) et analysée par M. Dumas qui lui a attribué la formule suivante :

$$2\,(Si\,O),\ Ca\,O + 2\,(Si\,O),\ Mn\,O.$$

Les échantillons que j'ai examinés venaient de la mine d'argent de Tétala et avaient été remis au laboratoire de l'École des Mines par M. Duport. Les uns renfermaient la bustamite à l'état naturel, les autres la bustamite altérée.

α. Bustamite non altérée. — Le minéral se présente en fibres rayonnées, lamelleuses dans le sens de leur longueur, d'un gris pâle tirant sur le rose ou sur le vert. Sa densité a été trouvée de 3,33 à 14 degrés.

Le minéral que j'ai examiné perdait 5,4 pour 100 de son poids par la chaleur. Cette perte est due à de l'acide carbonique combiné avec de la chaux; car en traitant la poudre par de l'acide nitrique faible et froid, on observe une effervescence très-sensible, et la liqueur ne contient que de la chaux dont la proportion s'accorde avec la perte au feu. La bustamite ainsi purifiée ne s'attaque que lentement par l'acide chlorhydrique. Je l'ai analysée au moyen du carbonate de soude. Sa composition est la suivante :

		Oxygène.		
Silice	44,45	23,09		2
Protoxyde de manganèse	26,96	5,91	10,53	1
Protoxyde de fer	1,15	0,26		
Chaux	14,43	4,11		
Magnésie	0,64	0,25		
Carbonate de chaux	12,27	»		
	99,90			

(1) *Annales des Sciences naturelles*, tome VIII.

Les résultats de cette analyse diffèrent un peu de ceux obtenus par M. Dumas, quant aux proportions relatives des bases, mais ils conduisent aussi à la formule générale des pyroxènes

$$2(SiO), (MnO, FeO, CaO, MgO).$$

β. *Bustamite décomposée.* — Le produit de la décomposition de la bustamite conserve la texture fibreuse et rayonnée de ce minéral. Sa couleur est d'un brun foncé. Il tache les doigts, et il est si tendre, qu'on peut le couper au couteau. Chauffé dans le tube fermé, il perd de l'eau. Avec l'acide nitrique, il se produit une effervescence sensible. L'acide chlorhydrique en dégage abondamment du chlore.

Les procédés employés pour l'analyse sont les mêmes que ceux dont je m'étais servi pour les matières précédentes. L'oxygène a été dosé au moyen de l'acide sulfureux. Pour avoir l'acide carbonique, j'ai calciné fortement la matière afin de ramener la chaux à l'état caustique, et le résidu a été traité par un courant d'hydrogène au rouge vif. L'eau a été dosée directement dans une autre expérience. En retranchant de la perte totale l'eau et l'oxygène trouvé par l'acide sulfureux, on a pu déterminer l'acide carbonique dont la proportion concordait exactement avec celle de la chaux. Voici les résultats de l'analyse :

		Oxygène.
Eau	10,68	9,49
Oxygène	10,98	10,98
Protoxyde de manganèse	55,19	12,11
Peroxyde de fer	1,56	»
Carbonate de chaux	14,03	»
Silice gélatineuse	1,21	»
Résidu insoluble dans l'acide chlorhydrique et dans la potasse	7,32	»
	100,97	

D'après la proportion d'oxygène donnée par l'acide sulfureux, on trouve, par un calcul simple, que la matière

analysée renferme un mélange de peroxyde et de deutoxyde de manganèse hydratés (MnO^2, HO) (Mn^2O^3, HO) dans la proportion d'environ 64,20 du premier, et 12,65 du second.

La quantité de chaux que l'on rencontre dans la bustamite altérée est bien loin d'être en rapport avec celle qu'on trouve dans le minéral non décomposé. Celui-ci contenait 21,30 de chaux pour 26,96 de protoxyde de manganèse, tandis que dans le produit de la décomposition on ne trouve que 7,81 de chaux (correspondant à 14,03 de calcaire) pour 55,19 de protoxyde. Ainsi, les $\frac{5}{6}$ de la chaux ont disparu. Quant à la silice, elle a été enlevée presque entièrement.

4°. *Grenat mélanite de Beaujeux* (Rhône).

Ce minéral forme un amas d'une grande puissance dans le gneiss. Il est traversé par des filons et des veines de fer oligiste qu'on exploite, ainsi que le grenat lui-même, comme minerai de fer. Le grenat est tantôt compacte, très-dur, à cassure résinoïde, tantôt il se présente en dodécaèdres rhomboïdaux d'une grande netteté, dont la surface est recouverte par places d'une pellicule noire de suroxyde de manganèse. Les cristaux s'écrasent aisément sous la pression du doigt en donnant un sable d'une couleur jaune sale, qui ne se laisse porphyriser qu'avec difficulté. Cette facile désagrégation du grenat et les taches noires dont il est parsemé à l'extérieur m'ayant fait penser que ce minéral avait éprouvé un commencement de décomposition, je l'ai soumis à l'analyse, en ayant soin de n'employer que des cristaux.

L'acide chlorhydrique l'attaque en formant gelée. La liqueur essayée par les réactifs n'a pas donné de traces de protoxyde de fer; j'y ai trouvé beaucoup de peroxyde de fer et de chaux. L'analyse qualitative a indiqué aussi de petites quantités d'alumine, d'oxyde de manganèse et de

magnésie. Il est difficile d'attaquer complétement ce grenat par l'acide chlorhydrique.

Deux analyses de ce minéral ont été faites, l'une sur 2gr,079, l'autre sur 2gr, 521, en l'attaquant par le carbonate de soude, et reprenant par l'eau et l'acide chlorhydrique. Le fer, l'alumine et le manganèse ont été précipités ensemble au moyen du sulfhydrate d'ammoniaque, et séparés ensuite par les moyens ordinaires (1). La chaux et la magnésie ont été précipitées par l'oxalate et le phosphate d'ammoniaque. J'ai obtenu dans les deux analyses :

	(1) Sur 2gr,079.	(2) Sur 2gr,521.
Silice	36,56	36,34
Alumine	2,01	2,12
Peroxyde de fer	29,36	29,60
Chaux	30,90	30,62
Protoxyde de manganèse	0,21	0,35
Magnésie	0,07	0,05
Eau	»	0,96
	99,11	100,04

	Moyenne.	Oxygène.	
Silice	36,45	18,95	
Alumine	2,06	0,96	9,80
Peroxyde de fer	29,48	8,84	
Chaux	30,76	8,77	8,85
Protoxyde de manganèse	0,28	0,06	
Magnésie	0,06	0,02	
Eau	0,96	»	
	100,05		

(1) J'ai reconnu que les sulfures précipités par le sulfhydrate d'ammoniaque entraînaient une quantité de chaux d'autant plus grande qu'il y en avait davantage dans la liqueur. Pour séparer la chaux précipitée, je redissolvais les sulfures bien lavés sur le filtre même avec de l'acide chlorhydrique étendu, et je précipitais de nouveau par le sulfhydrate d'ammoniaque. La liqueur, filtrée sur le même filtre que la première fois, renfermait

Les nombres obtenus dans l'analyse s'approchent beaucoup, comme on voit, de ceux qui correspondent à la formule des grenats 6 (SiO), (Al^2O^3, Fe^2O^3), 3 (CaO) ; mais on voit pourtant que les bases à trois atomes d'oxygène s'y trouvent déjà sensiblement en excès.

Quant on calcine le grenat, sa couleur passe du jaune sale au rouge briqueté, et ce fait annonce une certaine quantité d'hydrate de peroxyde de fer à l'état de liberté.

L'action du gaz hydrogène sur le grenat confirme ce fait : $1^{gr},692$ de grenat en poudre placés dans une nacelle de platine ont été chauffés dans un tube de verre vert, au milieu d'un courant d'hydrogène, jusqu'à une température voisine du ramollissement du verre. La perte de poids n'a été que de $0^{gr},025$, soit les 0,0148 du poids du grenat. Sa couleur a passé du jaune d'ocre au gris foncé. La nacelle soumise de nouveau à l'action de l'hydrogène pendant une demi-heure, à la même température qu'auparavant, n'a pas changé de poids. La quantité d'oxygène enlevée à cette température n'a donc été que les 0,005 du poids du grenat, puisque sur la perte totale il y avait 0,0096 d'eau. Mais en plaçant la nacelle dans un tube de porcelaine fortement chauffé et traversé par un courant d'hydrogène sec et pur, on a trouvé que les $1^{gr},667$ provenant de l'opération précé-

---

la presque totalité de la chaux qui avait été précipitée, mais il en restait encore des traces dans le précipité.

Pour montrer la difficulté qu'on éprouve à effectuer complétement la séparation, je rapporterai les nombres obtenus dans l'analyse faite sur $2^{gr},079$ de grenat.

a. Après avoir précipité une première fois par le sulfhydrate, la liqueur traitée par l'oxalate d'ammoniaque a donné un précipité qui, transformé en sulfate, pesait $1^{gr},426$.

b. Après avoir redissous les sulfures dans l'acide chlorhydrique et les avoir précipités de nouveau par le sulfhydrate, la liqueur filtrée a donné, sulfate de chaux $0^{gr},111$.

c. Enfin, après avoir séparé le fer du manganèse par le succinate d'ammoniaque, et après avoir précipité le manganèse par le sulfhydrate, la liqueur précipitée par l'oxalate a donné encore $0^{gr},020$ de sulfate de chaux.

dente ont perdu $0^{gr},154$ d'oxygène. Il n'y a pas eu ramollissement. La matière obtenue était noire. En la traitant par l'acide chlorhydrique étendu et à froid, elle s'est attaquée avec un vif dégagement d'hydrogène et formation d'un dépôt floconneux grisâtre de silice. Ce dépôt traité par la potasse liquide a laissé $0^{gr},059$ d'une matière identique avec le grenat. La perte dans l'hydrogène ne portait donc en réalité que sur $1^{gr},63$ du minéral. L'oxygène enlevé correspond à 30,7 pour 100 de peroxyde de fer, nombre très-voisin de celui fourni par l'analyse directe.

La faible perte de poids et le changement de couleur du grenat dans l'hydrogène au rouge naissant tiennent sans doute à la réduction de la petite quantité de peroxyde de fer qui s'y trouve à l'état de liberté. Il est très-remarquable que le peroxyde de fer combiné dans le grenat ne se transforme pas au moins en protoxyde à une température qui suffit pour la réduction complète du peroxyde isolé par l'hydrogène. Au rouge vif, le grenat se transforme dans l'hydrogène en fer métallique et en un silicate de chaux 2 (Si O) Ca O. analogue au pyroxène. Ce silicate s'attaque beaucoup plus facilement par les acides que le grenat lui-même, quoiqu'il renferme une moindre quantité de base.

Bien que les produits de la décomposition du grenat paraissent se rapprocher de ceux que j'ai signalés précédemment, j'attendrai, pour me prononcer à ce sujet, que j'aie pu examiner des matières dans un état plus avancé d'altération.

Produits de la décomposition des roches ignées.

J'ai commencé l'étude des produits de la décomposition des roches ignées par celles de ces roches qui s'éloignent le plus des granits par leur composition et la nature des minéraux qui s'y trouvent contenus. Le changement qu'éprouve le granit en se décomposant est suffisamment connu. On sait très-bien que l'altération et la désagrégation de la roche sont produites ici par la transformation du feldspath

en kaolin. En m'occupant d'abord des roches basaltiques, roches qui se décomposent, comme on sait, sous l'influence atmosphérique, avec une grande facilité, j'ai pu, au contraire, déterminer le mode d'altération des espèces non alcalifères, pyroxène et péridot, qui entrent dans leur composition.

1°. *Basalte de Crouzet.*

L'échantillon de basalte que j'ai examiné a été recueilli par M. Bertrand de Lom, à Crouzet, canton de Loudes (Haute-Loire); c'est un fragment arrondi qui se trouvait isolé, mais qui provenait sans doute des roches basaltiques de la même localité. Toute la surface du morceau, jusqu'à 5 et 6 millimètres de profondeur, était changée en une matière terreuse, d'un blanc un peu jaunâtre, friable, et que j'ai pu détacher aisément avec un couteau. L'intérieur était une roche compacte, d'un noir foncé, dans laquelle on distinguait des grains verts assez abondants de péridot, et quelques lamelles paraissant appartenir au labrador. La roche est légèrement attirable au barreau aimanté. Elle fond facilement en un verre noir au chalumeau.

En examinant avec soin le passage entre les deux parties de l'échantillon, on arrive à des résultats qui méritent l'attention.

On reconnaît d'abord, entre la partie non altérée et la croûte extérieure, une zone d'environ 1 millimètre d'épaisseur d'une teinte rougeâtre assez foncée. On remarque en outre dans le basalte, près de la partie altérée et jusque dans celle-ci, des vides de forme arrondie, qui présentent évidemment la place des cristaux de péridot; car les uns contiennent une certaine quantité d'oxyde de fer, les autres montrent encore des cristaux de péridot, mais désagrégés, comme cariés et un peu ocreux. Dans le centre de l'échantillon, le péridot n'est pas altéré. Il semblerait, à l'examen de l'échantillon, que le péridot se décompose ici avant les autres éléments du basalte.

J'ai examiné séparément le centre du morceau et la partie extérieure.

α. Basalte non altéré. — 1°. Pour faire l'analyse de ce minéral, on l'a fondu avec du carbonate de soude. La matière a été reprise par l'eau et l'acide chlorhydrique, et la silice séparée comme à l'ordinaire. Après l'avoir pesée, on l'a traitée par une dissolution de soude caustique; elle s'est dissoute presque en entier. Il est resté une petite quantité de matière qui a donné au chalumeau les réactions de l'acide titanique.

2°. La liqueur qui avait été séparée de la silice par la filtration, bouillie avec quelques gouttes d'acide nitrique pour peroxyder le fer, a été précipitée par l'ammoniaque. Le dépôt de peroxyde de fer et d'alumine a été redissous sur le filtre même dans l'acide chlorhydrique faible, et la liqueur a été précipitée par la soude caustique en excès, qui a redissous l'alumine et laissé le peroxyde de fer avec la magnésie et la petite quantité de chaux que l'alumine entraîne avec elle dans sa précipitation par l'ammoniaque. On a redissous ce précipité dans l'acide chlorhydrique, séparé le peroxyde de fer par l'ammoniaque, et réuni la liqueur filtrée à celle qui contenait la majeure partie de la chaux et de la magnésie. Toutes ces opérations se font en dissolvant et en recueillant les précipités toujours sur le même filtre.

L'alumine dissoute dans la soude en a été séparée en traitant la liqueur par l'acide chlorhydrique et le carbonate d'ammoniaque.

Le peroxyde de fer a été calciné et pesé. En le traitant par l'acide chlorhydrique concentré, il est resté un faible résidu qu'on a pesé et qui, examiné au chalumeau, consistait en silice et en acide titanique.

3°. On a précipité successivement la chaux et la magnésie par l'oxalate et le phosphate d'ammoniaque dans une liqueur alcaline.

On s'était assuré, par des expériences préliminaires, que la roche ne contenait pas de manganèse.

Une autre analyse a été faite en décomposant la roche par l'acide fluorhydrique dans une capsule de platine, évaporant à sec avec l'acide sulfurique, et reprenant par l'acide chlorhydrique. On a filtré et séparé le fer et l'alumine par l'ammoniaque, puis la chaux par l'oxalate d'ammoniaque. Le fer et l'alumine, en se précipitant, avaient entraîné de la magnésie, qu'on a séparée comme je l'ai indiqué tout à l'heure. La liqueur filtrée, après la précipitation de la chaux, a été évaporée à siccité, et le résidu calciné a laissé des sulfates alcalins mêlés de sulfate de magnésie. On a dissous ces sulfates dans l'eau, et précipité par l'acétate de baryte; puis on a évaporé à sec la liqueur filtrée, et calciné le résidu pour décomposer les acétates. La matière calcinée a été reprise par l'eau, qui a dissous les carbonates alcalins. On les a transformés en chlorures qu'on a pesés, puis on a déterminé la potasse au moyen du chlorure de platine, et dosé la soude par différence.

La magnésie restait avec le carbonate de baryte. On a dissous ce résidu dans l'acide chlorhydrique, précipité par l'acide sulfurique, et évaporé à sec la liqueur filtrée, ce qui a donné la magnésie à l'état de sulfate. On avait dosé déjà la magnésie entraînée par le peroxyde de fer et l'alumine.

J'ai donné plus haut, t. I, p. 249, un moyen plus prompt et tout aussi certain pour isoler la magnésie des alcalis; il repose sur l'emploi du carbonate de baryte et de l'acide carbonique agissant simultanément sur le mélange des sulfates : pn fprme de la sorte des carbonates alcalins et du carbonate de magnésie que l'eau sépare très-facilement.

J'ai admis, dans le calcul des analyses, que tout le fer se trouvait dans le basalte à l'état de protoxyde, ce qui n'est pas tout à fait exact, puisqu'il y a dans la roche une petite quantité de fer oxydulé.

Voici les résultats des deux analyses :

	1°. Par le carbonate de soude. Analyse sur 1gr,151.	2°. Par l'acide fluorhydrique. Analyse sur 1gr,339.	Moyenne.	Oxygène.	
Perte au feu.....	4,9	»	4,9	»	
Silice et acide titanique.....	46,1	»	46,1	23,97	
Alumine.....	13,6	12,8	13,2	6,16	
Chaux.....	7,1	7,5	7,3	2,08	9,48
Magnésie.....	7,2	6,8	7,0	2,71	
Protoxyde de fer..	16,5	16,7	16,6	3,70	
Potasse.....	»	1,8	1,8	0,30	
Soude.....	»	2,7	2,7	0,69	
			99,6		

Le basalte de Crouzet s'attaque par l'acide chlorhydrique, mais la proportion du résidu insoluble varie suivant la durée de l'attaque. Dans une première expérience, le poids du résidu insoluble dans l'acide chlorhydrique et la potasse liquide a été les 0,394 du poids du basalte. Dans une seconde expérience, il n'est resté que les 0,132 du poids de la matière soumise à l'essai. J'ai analysé séparément la liqueur chlorhydrique et le résidu insoluble provenant de cette seconde expérience. Voici leur composition :

	Partie soluble. (0,868 du poids total.)	Partie insoluble. (0,132.)
Eau.....	5,6	»
Silice.....	45,7	50,2
Alumine.....	13,1	13,8
Chaux.....	7,4	8,6
Magnésie.....	6,5	12,9
Protoxyde de fer.....	17,2	9,5
Alcalis et perte.....	4,5	5,0
	100,0	100,0

La composition de la partie insoluble ne diffère guère de celle de la partie soluble que par les proportions respectives de l'oxyde de fer et de la magnésie. Tous les éléments qui entrent dans la pâte du basalte paraissent s'attaquer aussi facilement les uns que les autres par l'acide chlorhydrique, sauf le péridot qui se concentrerait dans le résidu insoluble.

β. *Basalte décomposé.* — La matière terreuse d'un blanc sale qui forme la partie extérieure du basalte, essayée au chalumeau, n'a pas fondu. Elle donne, avec le nitrate de cobalt, la réaction de l'alumine. Elle ne fait pas pâte avec l'eau. Quand on la chauffe dans un tube fermé, elle dégage de l'eau et une forte odeur empyreumatique.

L'acide nitrique faible et froid ne produit pas d'effervescence. On trouve, dans la liqueur, après quelques heures de digestion, beaucoup d'alumine et seulement des traces de fer, de chaux et de magnésie. L'acide nitrique a dissous également une matière organique, car la liqueur, même après l'addition successive des réactifs qui avaient précipité l'alumine, la chaux et la magnésie, conservait une teinte jaune très-prononcée. L'acide chlorhydrique concentré et bouillant dissout, avec l'alumine, du peroxyde de fer et de la chaux en quantité notable, des traces seulement de magnésie et d'alcali, et de l'acide titanique en proportion sensible. Le résidu insoluble, traité par la soude liquide, laisse une partie inattaquée. Quand on traite la matière β par une dissolution de soude, celle-ci lui enlève une proportion très-notable d'alumine.

Pour analyser cette matière, j'en ai pris $1^{gr},708$ que j'ai calcinés assez fortement. La matière est devenue d'un gris foncé, résultat dû sans doute à la réduction de l'oxyde de fer par la matière organique. Le grillage lui a fait prendre une teinte briquetée très-claire. On a pesé le produit, puis on l'a fondu avec 5 grammes de carbonate de soude. On a repris par l'eau et l'acide chlorhydrique, et séparé la silice en évaporant fortement à sec à deux reprises avec de l'acide chlor-

hydrique, et reprenant finalement par de l'acide chlorhydrique concentré. On a filtré et pesé la silice obtenue (*a*).

La liqueur (*b*), séparée de la silice par la filtration, a été précipitée par l'ammoniaque. On a eu un dépôt abondant d'alumine à peine colorée par du peroxyde de fer : on l'a filtré. Ce précipité a été redissous sur le filtre par de l'acide chlorhydrique étendu, et la liqueur traitée par de la soude caustique en excès pour redissoudre l'alumine. On a filtré sur le même filtre que précédemment. L'alumine a été séparée de la liqueur alcaline par le moyen ordinaire; je me suis assuré qu'elle ne contenait pas de titane. Le précipité de peroxyde de fer obtenu sur le filtre pouvait retenir un peu de carbonate de chaux et de la magnésie. On l'a redissous dans l'acide chlorhydrique faible et précipité par l'ammoniaque. La liqueur filtrée a été réunie à la liqueur (*b*), d'où l'on avait précipité le fer et l'alumine par l'ammoniaque. Quant au peroxyde de fer, après l'avoir calciné et pesé, je l'ai traité par l'acide chlorhydrique concentré qui a laissé une petite quantité d'une matière blanc-jaunâtre, qui a été pesée, et que j'ai reconnue au chalumeau comme étant de l'acide titanique à peu près pur.

Dans la liqueur (*b*) on a séparé la chaux et la magnésie successivement par l'oxalate et le phosphate d'ammoniaque.

La silice (*a*) ne se dissolvant pas entièrement dans la soude liquide, on a pris le faible résidu insoluble qu'elle a laissé, et on l'a fondu de nouveau avec du carbonate de soude, puis on a repris par l'acide chlorhydrique en concentrant sans évaporer tout à fait à siccité. On a séparé la silice, puis on a précipité la liqueur par l'ammoniaque. L'alumine obtenue a été calcinée et pesée, puis on l'a traitée par l'acide chlorhydrique concentré, qui a laissé un peu d'acide titanique et de silice. La liqueur ammoniacale ne contenait ni chaux ni magnésie.

Pour doser les alcalis, une certaine quantité de matière a été traitée par l'acide chlorhydrique; mais on n'a dosé,

dans cette expérience, que les chlorures alcalins, qu'on a séparés par le chlorure de platine. On avait préalablement précipité, par le carbonate d'ammoniaque, la liqueur provenant de l'attaque. Quant à la magnésie, elle a été séparée des alcalis par le même procédé que tout à l'heure, au moyen de l'acétate de baryte.

Voici les résultats réunis des deux analyses :

		Oxygène.
Perte au feu (eau et matière organique)..	16,4	14,7
Silice.....	36,1	18,8
Alumine.....	30,5	14,2
Chaux.....	8,9	2,5
Peroxyde de fer.....	4,3	1,3
Magnésie.....	0,6	0,2
Potasse.....	0,7	0,1
Soude.....	1,0	0,3
Acide titanique.....	0,6	»
	99,2	

Dans une troisième analyse, j'ai attaqué la substance par l'acide chlorhydrique concentré, évaporé à sec et filtré. Le résidu calciné, après avoir été traité par une dissolution alcaline, représentait les 0,238 du poids de la matière. Ce résidu a été attaqué par le carbonate de soude. Voici la composition des deux parties :

	Partie soluble. (0,762.)		Partie insoluble. (0,238.)
Silice.....	29,1	Silice	62,4
Alumine.....	31,1	Alumine.....	26,4
Chaux..... ..	11,8	Chaux.....	traces.
Peroxyde de fer.....	5,2	Peroxyde de fer.	4,0
Magnésie.....	0,9	Magnésie.....	traces.
Potasse.....	0,6	Acide titanique.	2,6
Soude.....	0,8	Alcalis et perte.	4,6
Acide titanique.....	traces.		100,0
Eau, matière organique ...	20,5		
	100,0		

Les analyses qui précèdent montrent qu'il y a une très-grande différence de composition entre le basalte intact et le produit de son altération. L'alumine et l'eau sont en proportions beaucoup plus grandes, par rapport aux autres éléments, dans la roche altérée que dans la roche intacte. Si l'alumine a été entraînée par le fait de la décomposition, cela n'a pu avoir lieu qu'en proportion très-faible par rapport aux autres bases enlevées. Tout porte à croire que l'alumine du basalte se retrouve en entier dans le produit de la décomposition. Nous jugerons très-bien le résultat de celle-ci en rapportant la composition des deux matières à une proportion constante d'alumine, 100 par exemple, ce qui donnera :

	Basalte non altéré.	Basalte décomposé.
Alumine	100,0	100,0
Silice	347,5	118,3
Chaux	55,1	29,2
Peroxyde de fer (déduit du protoxyde)	138,7	14,1
Magnésie	52,8	1,9
Potasse	13,4	2,3
Soude	20,3	3,3
Eau	37,0	55,1
	764,8	324,2

Cette comparaison montre que dans l'acte de la décomposition, il y a fixation d'eau, mais que tous les autres éléments, sauf l'alumine, ont été entraînés en proportion plus ou moins grande. Les $\frac{96}{100}$ de la magnésie, les $\frac{9}{10}$ du fer, les $\frac{5}{6}$ des alcalis, les $\frac{2}{3}$ de la silice, la moitié de la chaux ont été séparés; plus des $\frac{75}{100}$ du poids du basalte ont disparu

Il est bien probable qu'une décomposition complète séparerait le reste des bases autres que l'alumine avec une nouvelle proportion de silice et conduirait à un silicate alumineux de la formule 3 (Si O), $Al^2 O^3 + Aq$, formule qui se-

rait la même que celle admise généralement pour le kaolin à l'état de pureté.

La disparition presque complète de la magnésie justifie la remarque que j'ai présentée plus haut relativement à la décomposition du péridot. Cet élément du basalte paraît être entraîné en entier dans la décomposition de la roche.

Walmstedt avait déjà analysé (*Annalen der Phys. und Chem.*, 1825, n° 6) des cristaux de péridot désagrégés et en voie de décomposition, et il leur avait trouvé une composition fort peu différente de celle du péridot non altéré. Le résultat de Walmstedt s'explique aisément d'après ce qui précède. La décomposition du péridot dans le basalte de Crouzet est accompagnée de la dissolution de tous les éléments qui constituent ce minéral, et le résidu doit donc avoir toujours à peu près la même composition que le minéral non altéré.

La chaux est, de toutes les bases contenues dans le basalte de Crouzet, celle qui paraît être entraînée le plus difficilement. Elle se trouve certainement en combinaison avec la silice et l'alumine dans le produit de la décomposition, et non à l'état de carbonate, car l'acide nitrique ne produit pas d'effervescence et ne dissout à froid presque que de l'alumine et seulement des traces de chaux. Il me paraît probable que cette combinaison de silice, d'alumine et de chaux n'aurait été elle-même que *transitoire*, et que la chaux aurait fini par être enlevée en totalité.

La suroxydation du fer paraît précéder son entraînement. La couche peu épaisse d'un rouge ocreux qui se trouve entre le basalte intact et la croûte extérieure correspond à cette phase de la décomposition. La disparition du fer est très-probablement liée à la présence de la matière organique qui se trouve dans la croûte extérieure. On sait effectivement que les matières organiques en décomposition dans un terrain ferrugineux peuvent transformer le peroxyde de fer en protoxyde, et former avec ce dernier un sel soluble

dans les eaux qui filtrent à travers le sol. Quand ces dissolutions ferrugineuses arrivent au contact de l'air, elles absorbent de l'oxygène, et du peroxyde de fer se dépose. Ce phénomène peut s'observer dans tous les terrains boisés dont le sol est argilo-ferrugineux. Toutes les coupures faites dans le terrain laissent suinter à certaines époques de l'année des filets d'eau ferrugineuse. Quand ce phénomène a lieu sur une grande échelle, on voit se former de véritables minerais de fer. Les minerais des marais de la Lusace, les minerais des lacs de la Suède paraissent être le produit d'une réaction analogue à celle que je viens d'indiquer; et leur formation se continue à l'époque actuelle (1).

2°. *Basalte de Polignac.*

Le morceau que j'ai examiné avait été détaché d'une roche basaltique située très-près de l'église du village de Polignac (Haute-Loire). L'intérieur avait une couleur d'un gris bleuâtre, et renfermait des cristaux visibles de fer oxydulé dont quelques-uns étaient recouverts déjà d'une légère couche ocreuse. En examinant la poussière au microscope, on reconnaît qu'elle est formée d'une pâte vitreuse transparente au milieu de laquelle sont disseminés quelques cristaux noirs paraissant appartenir à l'augite. Ce basalte agit sur l'aiguille aimantée. Il se désagrége facilement, et cette circonstance porterait à croire qu'il a déjà éprouvé un commencement d'altération.

La partie du basalte exposée à l'air était visiblement altérée sur un millimètre environ d'épaisseur, et transformée en une substance blanche très-tendre, facile à détacher avec un couteau, mais dans laquelle on distinguait encore avec la loupe des lamelles cristallines semblables à celles de la partie centrale.

α. *Partie non décomposée.* — Deux analyses ont été faites

(1) *Voir* une Notice publiée par M. Kindler, *Annales de Poggendorff*, 1836, n° 1.

de cette roche, l'une au moyen du carbonate de soude, l'autre au moyen de l'acide fluorhydrique. Dans celle-ci, on n'a dosé que les alcalis. Voici les résultats, le fer ayant été supposé à l'état de protoxyde :

		Oxygène.	
Perte au feu	3,7	»	
Silice	53,0	27,50	
Alumine	18,0	8,40	
Protoxyde de fer	9,5	2,10	6,64
Chaux	6,8	1,90	
Magnésie	3,5	1,40	
Potasse	2,7	0,45	
Soude	3,1	0,79	
Acide titanique	traces.		
	100,3		

Il est probable que l'élément feldspathique de ce basalte est de l'oligoclase 9 (Si O), $Al^2 O^3$, (Mg O, KO, Ca O, Na O) associé avec du pyroxène et du fer oxydulé. Toutefois l'état de la roche déjà un peu altérée permet quelques doutes à ce sujet.

β. *Partie décomposée.* — On l'a analysée par les mêmes moyens que la substance α, en l'attaquant la première fois par le carbonate de soude, et en ne dosant que les alcalis dans la seconde analyse faite au moyen de l'acide fluorhydrique. La calcination a fait prendre à cette matière une teinte un peu rougeâtre. En la chauffant dans un tube fermé par un bout, elle donne une odeur faiblement empyreumatique. Voici les résultats de cette analyse :

Perte au feu	3,5	»	
Silice	58,1	30,20	
Alumine	22,6	10,60	
Peroxyde de fer	4,0	1,20	
Chaux	2,9	0,80	3,0
Magnésie	2,2	0,90	
Potasse	2,3	0,40	
Soude	3,7	0,90	
	99,3		

Si l'on compare ces résultats avec ceux obtenus pour la substance α, on remarquera immédiatement que la silice et l'alumine sont les seuls éléments qui se trouvent en plus forte proportion dans la roche altérée que dans la roche intacte. Nous pourrons au reste rapporter la composition des deux parties de la roche à la même proportion d'alumine. On trouve en faisant cette comparaison :

	Roche non altérée.		Roche décomposée.
Alumine.....	100,0		100,0
Silice.....	294,3		257,1
Chaux..... ..	37,6		12,8
Magnésie..... ..	19,5		9,7
Protoxyde de fer..	52,7	Peroxyde...	17,7
Alcalis.....	32,3		26,8
Eau.....	20,3		15,5
	556,7		439,6

On voit ici, de même que pour le basalte de Crouzet, qu'une fraction considérable des bases autres que l'alumine a disparu par le fait de la décomposition, avec une certaine quantité de silice. On peut remarquer que la proportion des alcalis a été peu diminuée, ce qui prouve que la décomposition de l'élément pyroxénique a précédé celle de l'élément feldspathique. Celui-ci paraît être encore presque intact dans la matière blanche, d'un aspect un peu nacré, qui forme la partie altérée de la roche.

Il est à remarquer que la chaux s'est séparée ici en proportion beaucoup plus grande que dans la décomposition du basalte de Crouzet, et que c'est tout le contraire pour la magnésie. Il est probable que la partie feldspathique contient beaucoup de magnésie, et que la chaux se trouve surtout dans l'élément pyroxénique.

L'entraînement du fer paraît encore dû à la présence de la matière organique qu'on peut reconnaître dans la partie décomposée de la roche en la traitant par une lessive alcaline. La liqueur se colore en jaune en dissolvant une

petite proportion de silice et d'alumine. En saturant la dissolution par l'acide chlorhydrique, elle reste jaune, et quand on évapore à siccité pour séparer la silice, celle-ci se colore en noir. Le résidu insoluble dans la lessive alcaline contient de l'hydrate de peroxyde de fer qui colore le filtre, en sorte que le fer était très-probablement combiné avec la matière organique que l'alcali a dissoute.

3°. *Basalte du Kammer-Bull près Eger* (Bohême).

Le mode de décomposition de cette roche est celui qui paraît se présenter le plus fréquemment et sur la plus grande échelle avec les basaltes. Elle commence par se diviser en boules d'un diamètre plus ou moins considérable qui se séparent de la masse principale, et continuent ensuite à se décomposer sur toute leur surface extérieure. M. Debette, ingénieur des Mines, a recueilli sur place une de ces boules de la grosseur des deux poings, avec un échantillon de la roche non altérée, et a bien voulu les mettre à ma disposition.

La roche basaltique non altérée est noire, très-dure, un peu magnétique. Sa poussière est d'un gris foncé. En examinant ce basalte au microscope ou même avec une forte loupe, on y reconnaît distinctement trois espèces de cristaux : les uns vitreux, transparents et incolores, dont les formes sont très-peu nettes et qui appartiennent vraisemblablement, comme on le verra d'après l'analyse de la roche, soit au labrabor, soit à une espèce zéolitique; 2° des cristaux noirs, allongés, ressemblant à de l'augite; 3° enfin des grains cristallins d'un jaune verdâtre, analogues au péridot.

La boule qui provient de la décomposition du basalte se montre de plus en plus altérée à mesure qu'on approche de sa surface. La partie centrale est d'un gris noirâtre, d'un aspect déjà un peu terreux. On y reconnaît facilement au microscope les trois matières distinctes qu'on trouve dans la roche non altérée. Seulement la partie vitreuse et incolore a pris un aspect laiteux et des formes tout à fait in-

déterminées. La roche agit encore sensiblement sur le barreau aimanté. Elle est devenue friable et s'écrase aisément dans le mortier d'agate. Sa poussière est grise, mais d'un gris moins foncé que celle provenant de la roche non altérée.

La partie extérieure de la boule était formée d'une matière d'un blanc grisâtre parsemée de points d'une couleur un peu plus foncée. On n'y distinguait plus au microscope ni cristaux noirs ni grains de péridot. Cette partie de la roche se lie par des passages graduels et insensibles à la matière qui forme le centre de la boule.

Enfin, cette partie blanchâtre était recouverte çà et là d'une couche très-peu épaisse, de 1 millimètre au plus, d'une matière jaune-verdâtre, onctueuse au toucher, se laissant racler avec facilité, et présentant tous les caractères extérieurs de la *nontronite*. Cette substance forme comme un enduit à la surface de la roche altérée; elle ne se lie pas avec elle par des passages insensibles.

J'ai examiné séparément la roche intacte et les diverses substances qui proviennent de son altération graduelle.

α. *Basalte non altéré.* — Deux analyses ont été faites de cette roche : l'une en attaquant $1^{gr},310$ par 5 grammes de carbonate de soude, l'autre en en traitant $1^{gr},937$ par l'acide fluorhydrique. J'ai opéré dans les deux cas de la même manière que dans l'examen du basalte de Crouzet.

J'ai cherché en outre à déterminer la proportion des éléments solubles dans les acides, et particulièrement celle du fer oxydulé qui se trouve disséminé dans la roche. J'ai opéré de la manière suivante : 2 grammes de basalte porphyrisés ont été introduits dans un ballon contenant de l'acide chlorhydrique pur et bouillant, et on a maintenu l'ébullition pendant un quart d'heure. Au bout de ce temps, on a rempli le ballon aux trois quarts d'eau bouillante, puis on a fait arriver simultanément dans la liqueur un courant d'acide sulfureux produit en chauffant une dissolution saturée de ce gaz, et de l'acide carbonique pour empêcher l'air extérieur de pénétrer dans le ballon. La liqueur, qui

était jaune, s'est décolorée au bout de quelques minutes. On a fait bouillir pour chasser l'excès d'acide sulfureux, on a filtré et précipité l'acide sulfurique par le chlorure de barium. Le poids du sulfate de baryte obtenu a permis de calculer la quantité de peroxyde de fer dissoute par l'acide chlorhydrique, et par suite le fer oxydulé contenu dans la roche. Le résidu inattaqué par l'acide chlorhydrique ne renfermait plus de parcelles attirables à l'aimant.

Après avoir séparé le sulfate de baryte de la liqueur chlorhydrique, on a évaporé celle-ci à sec pour rendre insoluble une petite quantité de silice. On a filtré et précipité l'excès de baryte par l'acide sulfurique; le reste de l'analyse a été conduit comme à l'ordinaire. Quant au résidu inattaqué par l'acide chlorhydrique, on l'a calciné et pesé, puis on l'a fait bouillir avec une solution de soude caustique. Le résidu insoluble pesé a été fondu avec du carbonate de soude, et analysé comme je l'ai indiqué plus haut.

Voici les résultats des deux analyses faites au moyen de l'acide fluorhydrique et du carbonate de soude. J'ai fait entrer dans ces résultats la proportion de peroxyde de fer trouvé par l'acide sulfureux.

	1°. Par l'acide fluorhydrique. Analyse sur 1gr,937.	2°. Par le carbonate de soude. Analyse sur 1gr,310.	Moyenne.	Oxygène.
Perte au feu.....	»	4,4	4,4	3,90
Silice et traces d'acide titanique..	»	44,4	44,4	23,09
Alumine.....	12,1	12,3	12,2	5,70
Chaux.....	11,6	11,0	11,3	3,22
Magnésie.....	8,9	9,3	9,1	3,52
Peroxyde de fer..	3,5	3,5	3,5	1,05
Protoxyde.....	11,8	12,4	12,1	2,68
Potasse.....	0,8	»	0,8	0,13
Soude..... ...	2,7	»	2,7	0,69
			100,5	

Au lieu de 3,5 de peroxyde, et de 12,1 de protoxyde de fer, il convient d'admettre plutôt les proportions équivalentes de 5,1 de fer oxydulé (Fe^2O^3, FeO), et de 10,5 de protoxyde. Quant aux autres éléments, on verra, d'après le rapport des quantités d'oxygène des bases à celle de la silice, qu'on pourrait représenter la roche par un mélange de labrador, d'augite et de péridot, mais il faudrait ici faire abstraction de l'eau qui entre probablement dans la constitution d'un minéral zéolitique.

L'action de l'acide chlorhydrique sur le basalte ne permet pas de séparer nettement la partie feldspathique ou zéolitique du pyroxène et du péridot. Voici les résultats qu'elle a donnés :

	Partie soluble de la roche (0,[illegible] du poids total)	Partie insoluble (0,[illegible])
Fer	[illegible]	[illegible]
Silice	[illegible]	[illegible]
Alumine	[illegible]	[illegible]
Chaux	[illegible]	[illegible]
Protoxyde de fer	[illegible]	[illegible]
Fer oxydulé (Fe^2O^3, FeO)	[illegible]	[illegible]
Magnésie	[illegible]	[illegible]
Alcalis et perte	[illegible]	[illegible]
	[illegible]	[illegible]

Il est bien probable qu'une plus longue ébullition avec l'acide chlorhydrique aurait diminué le poids de la partie insoluble, comme cela est arrivé pour le basalte de Crouzet. La magnésie et surtout la chaux se concentrent dans le résidu insoluble, mais l'alumine s'y trouve encore en proportion beaucoup trop considérable pour qu'on puisse admettre que tout l'élément feldspathique a été attaqué par l'acide chlorhydrique.

2. *Basalte dans la première période de sa décomposition.* — Cette matière, qui se trouve au centre des boules décimées par le basalte en se décomposant, a pris un aspect un

peu terreux : les cristaux de péridot ont une légère teinte ocreuse. La couleur grise de la roche passe par calcination au gris-rougeâtre. Elle ne produit aucune effervescence quand on la traite par les acides.

J'ai fait deux analyses directes de cette roche, l'une par le carbonate de soude, l'autre par l'acide fluorhydrique. J'ai déterminé aussi la nature des principes solubles dans l'acide chlorhydrique et la proportion de peroxyde de fer, en opérant comme sur la roche non altérée. Voici les résultats obtenus :

	1°. Par le carbonate de soude. Analyse sur 1gr,464.	2°. Par l'acide fluorhydrique. Analyse sur 1gr,348.	Moyenne.
Eau	9,5	»	9,5
Silice et traces de titane	43,0	»	43,0
Alumine	14,0	13,8	13,9
Protoxyde de fer	12,7	13,7	13,2
Chaux	11,9	12,3	12,1
Magnésie	7,5	7,1	7,3
Alcalis	»	0,4	0,5
			99,5

D'après le poids du sulfate de baryte obtenu dans l'attaque par l'acide chlorhydrique, on trouve qu'il y a 5,4 pour 100 de peroxyde de fer, en sorte qu'au lieu de 13,2 de protoxyde indiqué dans l'analyse précédente, on doit admettre dans la matière 5,4 de peroxyde et 8,3 de protoxyde.

1gr,813 de la même substance ont été attaqués pendant un quart d'heure par l'acide chlorhydrique bouillant. Les liqueurs et le résidu insoluble ont été analysés comme je l'ai indiqué tout à l'heure ; la proportion des matières enlevées par l'acide chlorhydrique et la lessive alcaline a été de 0,637, le résidu insoluble de 0,363 ; on a obtenu pour leur

composition :

	Partie soluble (0,637 du poids total).	Partie insoluble (0,363 du poids total).
Perte au feu.....	14,9	»
Silice.....	41,1	46,3
Alumine.....	16,0	8,9
Peroxyde de fer.....	8,5	»
Protoxyde de fer.....	6,6	11,5
Chaux.....	6,1	23,2
Magnésie.....	5,8	10,0
Alcalis.....	non dosé.	»
	99,0	99,9

Les résultats de l'attaque par l'acide chlorhydrique sont bien comparables à ceux fournis par la roche non altérée. La partie insoluble dans l'acide chlorhydrique paraît posséder dans les deux cas une composition presque identique, ce qui semble prouver que le pyroxène et le péridot n'ont pas encore éprouvé d'altération dans cette première phase de la décomposition.

γ. *Basalte dans la deuxième période de la décomposition.* — Deux analyses ont été faites de la substance blanchâtre qui forme la partie extérieure des boules, l'une par le carbonate de soude, l'autre par l'acide fluorhydrique; celle-ci n'a donné que des traces très-faibles d'alcali. On a trouvé, dans cette analyse, une quantité sensible d'acide titanique, qu'on a séparée du peroxyde de fer après la précipitation par l'ammoniaque et l'enlèvement de l'alumine par la lessive alcaline.

La matière γ, attaquée par l'acide chlorhydrique, n'a pas produit d'effervescence. Tout le fer se trouvait à l'état de peroxyde dans la dissolution. Par calcination, la substance devient rougeâtre en perdant une fraction très-notable de son poids.

	1°. Par le carbonate de soude. Analyse sur 1gr,506.	2°. Par l'acide fluorhydrique. Analyse sur 1gr,195.	Moyenne.
Perte au feu	20,4	»	20,4
Silice.....	42,5	»	42,5
Alumine.....	17,8	18,0	17,9
Peroxyde de fer...	11,2	11,8	11,5
Chaux.....	2,7	2,4	2,5
Magnésie.....	3,3	3,3	3,3
Acide titanique...	»	1,2	1,2
Alcalis.....	»	0,2	0,2
			99,5

δ. *Matière jaune-verdâtre semblable à la nontronite.* — Cette matière a perdu les 0,214 de son poids par la calcination. En l'attaquant par l'acide chlorhydrique, elle a formé gelée, et la liqueur tenait en dissolution beaucoup de peroxyde de de fer, peu d'alumine, et des traces seulement de chaux et de magnésie. Je n'ai pu, du reste, faute d'un poids suffisant de cette matière, en faire une analyse exacte; mais la perte au feu et les expériences qualitatives qui précèdent suffisent pour la rapprocher de la *nontronite* à laquelle elle se rapporte également par ses caractères physiques.

ε. *Matière amorphe rougeâtre.* — On trouve encore au Kammer-Bull, en relation évidente avec le basalte, souvent à la surface de la roche, une matière amorphe, d'un blanc rougeâtre ou verdâtre, fendillée en plusieurs sens et facile à écraser sous le pilon. Elle contient :

Eau.....	1,8
Silice.....	94,9
Alumine.....	1,2
Peroxyde de fer.....	2,1
Chaux, magnésie.....	traces.
	100,0

Cette matière, bouillie avec une lessive alcaline, ne lui a cédé que 5 à 6 pour 100 de son poids, même après avoir été préalablement traitée par l'acide chlorhydrique. Son aspect est assez semblable à celui d'un précipité gélatineux desséché. Il est remarquable que la silice soit ici à l'état de la modification insoluble dans les alcalis.

Nous pouvons maintenant comparer les produits de l'altération du basalte (β, γ) à la roche elle-même, en rapportant chacun des éléments à la même quantité d'alumine que je représenterai par 100. On aura ainsi :

	Basalte non altéré. α.	Basalte au centre des boules. β.	Partie extérieure des boules. γ.
Alumine	100	100	100
Silice	364	309	237
Chaux	93	87	14
Magnésie	76	52	19
Peroxyde de fer	29	39	64
Protoxyde de fer	99	60	»
Potasse	6	4	1
Soude	22		
Eau	36	68	114
	825	719	549

Dans la première période de la décomposition, on voit que le basalte a perdu la presque totalité des alcalis avec une certaine quantité de silice, de magnésie et d'oxyde de fer. Bien qu'une portion très-notable du fer ait déjà disparu, on trouve que la proportion du peroxyde de fer s'est sensiblement augmentée, ce qui prouve qu'il y a eu à la fois suroxydation et élimination du métal. Une certaine quantité d'eau est entrée dans la constitution de la roche.

Dans la deuxième période de la décomposition, la majeure partie de la chaux et de la magnésie se séparent avec une fraction très-notable de la silice et du fer. Celui-ci reste en partie dans la roche à l'état de peroxyde en combinaison

avec la silice, et non à l'état d'hydrate isolé, comme le prouve la couleur de la matière ; une nouvelle quantité d'eau est entrée en combinaison.

Ainsi, la première période de la décomposition correspond à l'entraînement des alcalis, c'est-à-dire à la destruction de l'élément feldspathique ou zéolitique; la seconde correspond à l'altération du pyroxène et du péridot qui perdent une partie de leur silice et la majeure partie de leurs bases.

L'alumine est le seul élément permanent; l'eau est le seul élément dont la proportion s'accroisse.

L'entraînement de la silice est moins sensible ici que dans le cas du basalte de Crouzet, sans doute à cause de la formation d'un silicate de peroxyde de fer, combinaison éphémère qui sera détruite bientôt sous l'influence de la végétation ou de matières organiques en décomposition. Les silicates d'alumine sont au contraire tout à fait permanents. La chaux et la magnésie qui sont dans le résidu de la décomposition, s'y trouvent aussi dans un état de combinaison peu stable, que l'action prolongée des mêmes agents finirait probablement par détruire complétement.

Quant aux produits accessoires dont j'ai signalé la présence, soit à la surface des boules du basalte en décomposition, comme la nontronite, soit seulement en relation avec la roche, comme la silice presque pure, dont j'ai donné tout à l'heure l'analyse, ils paraissent avoir été formés par les éléments qui, après avoir quitté la roche, se sont précipités de nouveau du sein du dissolvant qui entraînait les produits solubles de la décomposition du silicate.

On peut résumer ainsi qu'il suit les principaux résultats des recherches qui précèdent sur la décomposition des silicates par les agents atmosphériques. Ces principes sont complétement indépendants de toute hypothèse sur les causes premières de l'altération et sur le rôle des agents qui la produisent.

1°. Dans la décomposition des silicates contenant de la chaux, de la magnésie, des protoxydes de fer et de manganèse sans alumine, on trouve constamment que la silice, la chaux et la magnésie sont éliminées et tendent à disparaître complétement par le fait de la décomposition. Mais tantôt le fer et le manganèse restent dans le résidu de la décomposition à un état d'oxydation supérieur au protoxyde (bisilicate de manganèse, bustamite), tantôt ils disparaissent comme les autres bases (péridot, augite des basaltes d'Auvergne).

2°. Dans la décomposition des silicates contenant de l'alumine et des alcalis avec ou sans les autres bases, l'expérience prouve que l'alumine se concentre dans le produit de la décomposition en retenant une portion de la silice et fixant une certaine quantité d'eau, et que les autres bases sont entraînées avec une grande partie de la silice. Le produit final de la décomposition se rapproche de plus en plus d'un silicate d'alumine hydraté.

Ce principe comprend comme cas particulier la décomposition du feldspath et sa transformation en kaolin.

Des actions chimiques auxquelles on peut attribuer la décomposition des silicates.

Nous pouvons maintenant chercher à apprécier les influences sous lesquelles les silicates se décomposent, et à déterminer en même temps dans quel état de combinaison sont entraînés les éléments qui disparaissent.

Je n'ai pas l'intention de parler ici des relations de contact considérées comme la cause première de la décomposition des roches. Je n'aurais aucun fait à ajouter à ceux qui ont été signalés par M. A. Brongniart dans son important travail sur le gisement des kaolins (1). D'après ce célèbre géologue, les gîtes de kaolin les plus considérables sont

(1) *Archives du Muséum*, tome I, 1839; et tome II, 1841

constamment associés à des roches ferrugineuses également décomposées. Les courants électriques résultant du contact de ces roches hétérogènes ont pu en déterminer et en accélérer l'altération. En décomposant du feldspath par la pile voltaïque, et même par de l'électricité à faible tension, M. Brongniart a fourni un remarquable appui à cette hypothèse. Toutefois, quand des roches se décomposent à l'air sur de grandes étendues de terrain, comme cela arrive souvent pour les granits, les basaltes et d'autres roches, il ne paraît pas que des relations de contact soient nécessaires pour que la décomposition ait lieu. Au reste, les considérations que je vais exposer sont indépendantes de l'existence de cette cause première.

La décomposition du feldspath est le seul fait dont les chimistes et les minéralogistes se soient beaucoup occupés. Les importants usages du produit de cette décomposition expliquent facilement l'intérêt qui s'attachait à l'explication de son origine. On a cru d'abord que le kaolin ne différait du feldspath que par la soustraction de l'alcali. M. Berthier a prouvé le premier ce fait très-important, qu'une portion considérable de la silice était entraînée en même temps que l'alcali. M. Berthier admettait que le feldspath 12 (Si O), Al^2O^3, KO se dédoublait en 9 (Si O), K O qui était entraîné par l'eau, et en 3 (Si O), Al^2O^3 qui restait. Dans les travaux qui ont été publiés depuis sur ce sujet par M. Forchammer et par MM. Brongniart et Malaguti, on a constamment admis que l'entraînement de la silice était la conséquence de la présence de l'alcali et de la solubilité du silicate alcalin qui se séparait. Les recherches que je viens d'exposer ont montré que des silicates sans alcali se décomposent aussi facilement que les espèces feldspathiques, quelquefois même avant elles, et que l'entraînement de la silice est dans certains cas beaucoup plus complet que dans le kaolin. La séparation de la silice peut donc être tout à fait indépendante de la présence des alcalis.

déterminées. La roche agit encore sensiblement sur le barreau aimanté. Elle est devenue friable et s'écrase aisément dans le mortier d'agate. Sa poussière est grise, mais d'un gris moins foncé que celle provenant de la roche non altérée.

La partie extérieure de la boule était formée d'une matière d'un blanc grisâtre parsemée de points d'une couleur un peu plus foncée. On n'y distinguait plus au microscope ni cristaux noirs ni grains de péridot. Cette partie de la roche se lie par des passages graduels et insensibles à la matière qui forme le centre de la boule.

Enfin, cette partie blanchâtre était recouverte çà et là d'une couche très-peu épaisse, de 1 millimètre au plus, d'une matière jaune-verdâtre, onctueuse au toucher, se laissant racler avec facilité, et présentant tous les caractères extérieurs de la *nontronite*. Cette substance forme comme un enduit à la surface de la roche altérée; elle ne se lie pas avec elle par des passages insensibles.

J'ai examiné séparément la roche intacte et les diverses substances qui proviennent de son altération graduelle.

α. *Basalte non altéré.* — Deux analyses ont été faites de cette roche : l'une en attaquant $1^{gr},310$ par 5 grammes de carbonate de soude, l'autre en en traitant $1^{gr},937$ par l'acide fluorhydrique. J'ai opéré dans les deux cas de la même manière que dans l'examen du basalte de Crouzet.

J'ai cherché en outre à déterminer la proportion des éléments solubles dans les acides, et particulièrement celle du fer oxydulé qui se trouve disséminé dans la roche. J'ai opéré de la manière suivante : 2 grammes de basalte porphyrisés ont été introduits dans un ballon contenant de l'acide chlorhydrique pur et bouillant, et on a maintenu l'ébullition pendant un quart d'heure. Au bout de ce temps, on a rempli le ballon aux trois quarts d'eau bouillante, puis on a fait arriver simultanément dans la liqueur un courant d'acide sulfureux produit en chauffant une dissolution saturée de ce gaz, et de l'acide carbonique pour empêcher l'air extérieur de pénétrer dans le ballon. La liqueur, qui

était jaune, s'est décolorée au bout de quelques minutes. On a fait bouillir pour chasser l'excès d'acide sulfureux, on a filtré et précipité l'acide sulfurique par le chlorure de barium. Le poids du sulfate de baryte obtenu a permis de calculer la quantité de peroxyde de fer dissoute par l'acide chlorhydrique, et par suite le fer oxydulé contenu dans la roche. Le résidu inattaqué par l'acide chlorhydrique ne renfermait plus de parcelles attirables à l'aimant.

Après avoir séparé le sulfate de baryte de la liqueur chlorhydrique, on a évaporé celle-ci à sec pour rendre insoluble une petite quantité de silice. On a filtré et précipité l'excès de baryte par l'acide sulfurique; le reste de l'analyse a été conduit comme à l'ordinaire. Quant au résidu inattaqué par l'acide chlorhydrique, on l'a calciné et pesé, puis on l'a fait bouillir avec une solution de soude caustique. Le résidu insoluble pesé a été fondu avec du carbonate de soude, et analysé comme je l'ai indiqué plus haut.

Voici les résultats des deux analyses faites au moyen de l'acide fluorhydrique et du carbonate de soude. J'ai fait entrer dans ces résultats la proportion de peroxyde de fer trouvé par l'acide sulfureux.

	1°. Par l'acide fluorhydrique. Analyse sur 1gr,937.	2°. Par le carbonate de soude. Analyse sur 1gr,310.	Moyenne.	Oxygène.
Perte au feu.....	»	4,4	4,4	3,90
Silice et traces d'acide titanique..	»	44,4	44,4	23,09
Alumine.....	12,1	12,3	12,2	5,70
Chaux.....	11,6	11,0	11,3	3,22
Magnésie.....	8,9	9,3	9,1	3,52
Peroxyde de fer..	3,5	3,5	3,5	1,05
Protoxyde.....	11,8	12,4	12,1	2,68
Potasse.....	0,8	»	0,8	0,13
Soude..... ...	2,7	»	2,7	0,69
			100,5	

ou accélérer la décomposition des silicates avec lesquels elles sont en contact. D'un autre côté, la décomposition des matières organiques dans le sol exerce, comme nous l'avons vu déjà, une action dissolvante sur plusieurs des matériaux qui entrent dans sa composition, particulièrement sur ses éléments ferrugineux, et il est probable que des acides organiques autres que l'acide carbonique concourent à cette réaction.

Cette question, que je me contente d'indiquer, se lie à une autre d'un grand intérêt, la formation de la terre végétale et ses relations de composition avec la roche sur laquelle elle repose. Tout porte à croire que l'élément minéral de la terre végétale est, dans la plupart des cas, le produit de la décomposition du sol situé au-dessous. Les terres végétales qui reposent sur des basaltes ou des laves sont, en Auvergne, d'après M. Fournet, beaucoup plus fertiles que celles du granit ou du gneiss. Les basaltes renferment en effet toutes les bases que l'on trouve dans les cendres, des traces notables d'acide phosphorique, et la décomposition de la roche permet facilement aux végétaux de s'assimiler ses éléments. Je me propose d'étudier cette question en continuant ces recherches.

Influence des phénomènes de la nitrification. — Les phénomènes de la nitrification ne sont sans doute pas non plus sans influence sur la décomposition des roches silicatées.

On sait que les nitrates se produisent spontanément dans les climats chauds sur de grandes étendues de terrain. En Afrique, en Espagne, en Perse, on cite des plaines entières où le nitrate de potasse vient cristalliser, lors des sécheresses, à la surface du sol. La présence des nitrates de chaux et de magnésie n'a pas été constatée dans les mêmes circonstances, sans doute à cause de la grande solubilité de ces sels. Le nitrate d'ammoniaque contenu dans les pluies d'orage est probablement l'agent de la nitrification. Qu'il réagisse directement sur les silicates désagrégés ou bien sur

les carbonates déjà produits par leur décomposition, le résidu sera toujours une argile et du peroxyde de fer.

Les différentes causes que je viens d'indiquer contribuent vraisemblablement toutes les trois, dans une certaine mesure, et avec une intensité variable suivant les localités, à la décomposition des silicates. Il en résulte des sels solubles que les eaux entraîneront dans le réservoir commun.

Sur la nature des terrains formés par les produits de la décomposition des silicates.

Il est facile maintenant de saisir la liaison qui existe entre les faits qui précèdent et les considérations que j'ai développées au commencement de ce Mémoire, sur la composition chimique comparée des terrains.

Quel que soit le mode de combinaison des bases enlevées aux silicates, elles doivent produire en définitive, quand elles arrivent dans les eaux de la mer, les mêmes composés. Le carbonates terreux finiront par se décomposer, ou seront absorbés par les animaux marins, mollusques ou zoophytes. Les carbonates alcalins, réagissant sur les sels calcaires contenus dans l'eau de la mer, en précipiteront une quantité proportionnelle de carbonate de chaux. Quant aux nitrates et aux sels organiques, on n'en a jamais trouvé de traces dans les eaux d'aucune mer ou d'aucun lac (1). Ce résultat montre, ce me semble, que ces sels se décomposent eux-mêmes dans l'eau de la mer, probablement sous l'influence des matières organiques, pour produire en dernier résultat des carbonates terreux, puisque l'acide carbonique est le seul acide libre à la surface du globe.

Le fer et le manganèse se sépareront aussi de leurs dissolutions sous l'influence de l'oxygène, à l'état de peroxydes hydratés. La silice, qui a été dissoute dans la décomposi-

(1) Il faut en excepter le nitrate de soude du Pérou, qui s'est probablement formé par l'évaporation à siccité d'un lac dont les eaux se sont saturées de nitrates amenés par les affluents.

tion du silicate, se déposera à son tour, soit spontanément, soit par l'intermédiaire de corps organisés. Quant au résidu de cette décomposition qui se composera d'argile plus ou moins ferrugineuse mêlée de quartz, si la roche non altérée en contenait, il sera entraîné également, mais en vertu d'une action tout à fait mécanique, et viendra se déposer au fond d'une mer ou d'un lac, la plupart du temps en mélange avec quelques-uns des autres corps qui s'y précipitent par suite d'une action chimique. Chacun des affluents amenant des matériaux différents, les uns dissous, les autres, de grosseur variable, entraînés mécaniquement, on conçoit très-bien la variété de nature et de composition qui en résultera dans les roches qui se déposeront au sein de la masse liquide. Je n'insiste pas plus longtemps sur ces rapprochements qui se déduisent, de la manière la plus naturelle, des résultats analytiques qui précèdent.

L'immense épaisseur des grès quartzeux et des argiles, dans toute la série des formations, accuse la décomposition d'une masse énorme de roches ignées (1). Faut-il considérer aussi la totalité des carbonates de chaux et de magnésie des terrains de sédiment comme des produits de cette même décomposition? je ne le pense pas. La chaux n'existe pas en proportion assez considérable dans les silicates complexes des terrains plutoniques pour que nous soyons autorisés à considérer cette source de calcaire comme la seule, et il est fort probable que des masses de calcaire primitif enclavées dans des roches de cristallisation et dissoutes par des eaux minérales ont concouru à cette formation.

Je n'ai pas besoin d'ajouter que les terrains stratifiés

(1) M. Al. Brongniart, dans le travail cité plus haut sur le gisement des kaolins, avait déjà énoncé comme une chose probable, que les argiles n'étaient que des mélanges d'une matière analogue au kaolin avec d'autres matériaux d'une nature variable qui se déposaient simultanément dans le même bassin.

déjà hors du sein des eaux ont dû contribuer, à toutes les époques géologiques, simultanément avec les roches ignées, à produire les formations nouvelles qui se déposaient dans les mers ou dans les lacs.

Des relations qui existent entre l'altération des silicates et la composition de l'air atmosphérique; examen général des causes qui tendent à modifier cette composition.

Il est une autre question fort importante pour l'histoire du globe, et qui se lie aussi d'une manière intime aux recherches qu'on vient de lire. Je veux parler des modifications qui peuvent être produites dans la nature de l'air atmosphérique par suite de la formation ou de la décomposition des terrains. Il est facile de voir que la décomposition des roches d'origine ignée tend constamment à séparer de l'air son oxygène et son acide carbonique, celui-ci par la formation des carbonates alcalins et terreux, l'autre par la suroxydation du fer et du manganèse. Ces causes d'absorption de deux principes si essentiels à la vie organique agissent, il est vrai, avec lenteur; mais il n'est pas douteux que leurs effets, en s'accumulant pendant une longue suite de siècles, ne puissent amener des changements notables dans la composition de notre atmosphère, s'ils ne sont pas contrebalancés par des phénomènes physiques d'un ordre inverse. C'est par l'examen de ces réactions que je terminerai ce Mémoire. J'espère montrer, par la discussion des causes qui tendent à modifier la composition de l'air, toute l'importance, sous ce rapport, des actions chimiques auxquelles prennent part les éléments minéraux de l'écorce solide du globe.

Causes de diminution ou d'augmentation dans la proportion d'acide carbonique. — L'acide carbonique entre, comme on sait, pour moins d'un demi-millième dans la composition de l'atmosphère. Personne n'ignore qu'il est décomposé par

les végétaux vivants, et reproduit par les végétaux en décomposition ou par les animaux qui s'en nourrissent. Dans ce passage alternatif du carbone de l'état gazeux à l'état solide, de l'état solide à l'état gazeux, l'air contiendrait toujours la même proportion d'acide carbonique, si la masse du carbone entré dans la vie organique ne variait pas, si tous les êtres organisés subissaient, après leur mort, une décomposition complète, si, enfin, ce gaz n'était pas absorbé par les éléments minéraux du globe.

Formation des combustibles fossiles. — Or, tous les végétaux ne restituent pas complétement leur carbone à l'atmosphère; la formation des combustibles minéraux aux anciennes époques géologiques, celle des tourbières, à l'époque actuelle, prouvent cette soustraction du carbone. Il reste dans l'air un volume d'oxygène égal au volume de l'acide carbonique décomposé.

Action de l'air sur les matières d'origine organique contenues dans les terrains. — L'action de l'air atmosphérique sur un grand nombre de terrains, tend à produire un résultat inverse du précédent. Je ne parlerai pas de l'emploi fait par l'homme des combustibles minéraux, emploi qui restitue à l'atmosphère une partie du carbone qui en avait été séparé à d'anciennes époques, mais je ferai remarquer qu'il existe du carbone à l'état de composé combustible, disséminé dans un grand nombre de couches de presque tous les terrains. La plupart des schistes, des marnes, des calcaires contiennent des matières bitumineuses en quantités quelquefois considérables, et l'expérience nous apprend que, dans toutes les parties de ces couches exposées à l'air, jusqu'à une assez grande profondeur, la matière combustible a été enlevée sous l'action lente de l'atmosphère. On sait, par exemple, que presque toutes les couches de houille ont leurs affleurements en décomposition complète, et que le combustible qui s'y trouve a perdu presque tout son pouvoir calorifique.

Cette formation d'acide carbonique produit une absorption d'oxygène (1).

Projections d'acide carbonique par les volcans. — La proportion d'acide carbonique de l'atmosphère se trouve augmentée par toutes les projections de ce gaz, qui ont lieu par les volcans, ou qui sont en rapport avec les phénomènes volcaniques. M. Boussingault a montré que les gaz des volcans des Andes étaient presque uniquement formés d'acide carbonique, et il est probable qu'il en est de même pour les autres orifices volcaniques; on sait que les environs du Vésuve laissent dégager ce gaz en grande quantité. Cette émission de gaz provient sans doute de la décomposition de carbonates, sous l'influence de roches siliceuses et d'une haute température. S'il en est ainsi, on voit que la formation des silicates complexes des terrains volcaniques fournit à l'atmosphère de l'acide carbonique, qui plus tard sera absorbé, solidifié de nouveau dans la décomposition lente qu'ils subiront.

Causes de diminution ou d'augmentation dans la proportion d'oxygène. — Il me reste à indiquer les causes qui tendent à faire varier la proportion d'oxygène dans l'atmosphère.

J'ai montré, dans ce qui précède, que la présence du peroxyde de fer dans les terrains sédimentaires semblait correspondre à la décomposition de roches ferrifères, et à une absorption d'oxygène atmosphérique. Si l'on considère que le peroxyde de fer se trouve, en proportion souvent considérable, disséminé dans un grand nombre de couches des terrains stratifiés (2), il sera permis d'en conclure que la

(1) On sait, d'après les expériences de Saussure, que toutes les matières combustibles disséminées dans l'air se changent en acide carbonique au contact de l'oxygène et de matières organiques en décomposition.

(2) Le poids d'oxygène contenu dans l'atmosphère et correspondant à 1 mètre carré de surface est de 2,373 kilogrammes. La quantité de protoxyde de fer nécessaire pour absorber tout cet oxygène en se transformant en peroxyde, serait 21,357 kilogrammes qui formeraient 23,730 kilogrammes de per-

formation de cette matière a eu une influence très-notable sur la composition de l'atmosphère, pendant la durée des périodes géologiques.

Formation de la pyrite de fer. — Je ne connais qu'une seule réaction qui ait pu produire le phénomène inverse, c'est-à-dire restituer à l'atmosphère de l'oxygène emprunté aux éléments minéraux de la surface du globe. On trouve le produit de cette réaction dans un grand nombre de couches des terrains stratifiés, et assez abondamment pour que l'on soit autorisé à en conclure que sa production a été accompagnée de la mise en liberté d'une grande quantité d'oxygène. Je veux parler de la pyrite de fer. Ce minéral existe, souvent avec abondance, dans un très-grand nombre de couches, depuis le terrain de transition jusque dans les terrains tertiaires. Sa présence a été signalée très-souvent par les géologues comme celle d'un élément constitutif de certaines couches, et, sans son altérabilité au contact de l'air, elle l'aurait été bien davantage encore. On trouve en effet, et je pourrais en citer plusieurs exemples, des couches dont les affleurements ne renferment pas de pyrites, et qui, attaquées dans la profondeur, montrent ce minéral en grande abondance. Son origine ne me paraît pas douteuse. Les pyrites de fer se trouvent presque constamment associées à des matières organiques; on les rencontre dans les couches de houille, dans les marnes et les schistes bitumineux, où elles remplacent le têt des coquilles. J'ai observé plusieurs fois, dans la couche de minerai de fer qui se trouve dans le Jura, à la base de l'oolite inférieure, des morceaux de bois fossile dont les fibres ligneuses étaient transformées en pyrites. Enfin, et cette circonstance indique très-clairement son

oxyde de fer. Or, si l'on suppose que l'épaisseur moyenne des terrains stratifiés répartis sur toutes les surfaces du globe soit seulement de 1,000 mètres, et leur densité moyenne de 2,5, leur poids par mètre carré serait d'environ 2,500,000 kilogrammes, et l'on voit qu'il suffirait de 1 pour 100 de peroxyde de fer dans les couches pour représenter une absorption d'oxygène équivalente à tout l'oxygène existant actuellement dans l'atmosphère.

mode de formation, on voit ce minéral se produire, à l'époque actuelle, dans tous les cas où des matières organiques en décomposition se trouvent en contact avec du fer ou des oxydes de fer et des sulfates, hors de l'influence oxydante de l'air. Ainsi M. Berthier a trouvé que la matière ligneuse du bois attachée à une ancre de fer perdue dans la Seine depuis quatre siècles était transformée en un mélange de carbonate de chaux et de pyrite magnétique (1). M. Braconnot a examiné du bois pourri en partie pyritisé; il a trouvé du sulfure de fer dans la boue des égouts (2). L'explication de son origine dans toutes ces matières ne présente aucune difficulté en présence de ce fait constaté depuis longtemps (3), que les matières organiques en décomposition peuvent transformer les sulfates alcalins ou alcalino-terreux en sulfures. La présence des pyrites dans toutes les couches des terrains de sédiment s'explique très-aisément de cette manière, et il me semble même qu'on ne peut pas en donner d'autre explication. Toutes les circonstances de son gisement s'accordent également avec cette origine (4).

Si nous admettons que la matière organique qui a servi à la décomposition des sulfates et du peroxyde de fer soit

(1) *Annales des Mines*, 3e série, tome XIII, page 664.

(2) *Annales de Chimie*, tome L, page 213.

(3) *Voyez* à cet égard les articles EAUX NATURELLES et HYDROGÈNE SULFURÉ du *Dictionnaire des Sciences naturelles*; par M. Chevreul.

(4) J'ai essayé de reproduire artificiellement de la pyrite en plaçant dans un flacon plein d'eau de l'hydroxyde de fer naturel, du sulfate de chaux cristallisé et du bois. Le flacon était exactement rempli et bouché. Au bout de quelques jours, l'eau a pris une odeur sensible qui est devenue très-infecte après quelques semaines. La liqueur, un peu jaunâtre dans les premiers jours, a pris une couleur verte au bout de deux mois, exactement comme de l'eau qui tiendrait des traces de sulfure de fer en dissolution. En même temps, le bois et la boue qui se trouvaient au fond du flacon sont devenus tout à fait noirs. En les lavant avec soin à l'eau pure, et les traitant ensuite par de l'acide sulfurique très-faible, la couleur noire disparaît et la liqueur prend une odeur très-forte d'hydrogène sulfuré. L'expérience se continue; j'espère qu'elle permettra d'obtenir de la pyrite. Elle met déjà hors de doute la possibilité de la formation du sulfure de fer dans les circonstances que j'ai indiquées.

analogue aux matières ligneuses, et ce sont certainement les plus abondantes parmi toutes celles qui sont charriées par les eaux; nous pourrons faire abstraction de l'action réduisante de l'hydrogène, et ne considérer que celle du carbone, puisque ces matières équivalent à très-peu près à du carbone plus de l'eau. La réaction s'exprime alors de la manière suivante :

$$2(Fe^2O^3)+8(SO^3).CaO+15C=4(FeS^2)+8(CaO,CO^2)+7(CO^2).$$

Toute la chaux du sulfate se change en carbonate, et les $\frac{8}{15}$ du carbone de la matière organique se minéralisent et se précipitent en même temps. Le reste du carbone se trouve restitué à l'atmosphère à l'état d'acide carbonique. Or les 15 équivalents de carbone (1125) avaient abandonné 30 équivalents d'oxygène (3000) avant de passer dans l'organisation. Toute cette quantité d'oxygène reste définitivement acquise à l'atmosphère par suite de la formation de la pyrite, puisque la matière organique se brûle par l'oxygène de l'acide sulfurique et du peroxyde de fer. En admettant 350 pour l'équivalent du fer et 200 pour celui du soufre, on trouve que le poids des 4 équivalents de pyrite est exactement de 3,000, qui correspondent à 3,000 d'oxygène devenu libre. L'atmosphère avait perdu 15 équivalents de carbone par la formation de la matière ligneuse; 8 équivalents (600) restent à l'état de carbonate de chaux; les autres rentrent dans l'atmosphère à l'état d'acide carbonique, en combinaison avec 1,400 d'oxygène. Ainsi, au lieu de 600 de carbone précipité, on a, dans l'atmosphère, 1,400 d'oxygène de plus à l'état d'acide carbonique. Le gain définitif, pour la pression atmosphérique, est de 800.

En résumé, pour 1 en poids de pyrite formée, il y a 1 d'oxygène mis en liberté dans l'atmosphère et précipitation de 0,20 de carbone.

L'atmosphère actuelle renfermant en poids 23 pour 100 d'oxygène et $\frac{4,5}{10,000}$ d'acide carbonique, on trouvera facilement que les quantités d'oxygène et de carbone correspon-

dant à 1 mètre carré de surface sont 2,373 kilogrammes et $1^k,24$; or la densité de la pyrite de fer étant de 4,84, on voit qu'une épaisseur de moins de 50 centimètres de cette matière, répartie uniformément sur toute la surface du globe, correspondrait à une quantité d'oxygène égale à celle contenue dans l'air, et à une proportion de carbone quatre cents fois plus considérable que celle qui y existe aujourd'hui. Si, comme tout porte à le penser, cette évaluation de la proportion de pyrite contenue dans les roches stratifiées est plutôt au-dessous qu'au-dessus de la réalité, on peut juger par là de l'influence que la formation de ce minéral a dû avoir sur la composition de l'air aux diverses époques géologiques.

La formation de la pyrite de fer se continue vraisemblablement encore aujourd'hui sur une grande échelle. On sait, en effet, par les expériences de M. Daniell (1), que les eaux de l'Océan renferment, le long des côtes occidentales de l'Afrique, sur plus de 16 degrés en latitude, des quantités fort notables d'hydrogène sulfuré, qui s'y trouve formé par la réaction des matières organiques sur les sulfates contenus dans ces eaux. L'insalubrité du littoral des grands continents, dans les régions chaudes et surtout dans les régions intertropicales, est due, suivant M. Daniell (2), à la présence de l'hydrogène sulfuré. Si les fleuves charrient des limons ferrugineux en même temps que des matières organiques, tout semble indiquer qu'à leur arrivée dans la mer il devra se former de la pyrite.

Décomposition de la pyrite de fer. — La décomposition de la pyrite qui s'opère par le contact de l'air avec les tranches des terrains qui en renferment, conduit au résultat inverse du précédent. Comme le produit de cette altération finira par rencontrer du carbonate de chaux, il en résul-

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, tome III, page 331.

(2) *Voyez* aussi le Mémoire de M. Savi (*Annales de Chimie*, tome III, 344), sur les causes de l'insalubrité de l'air dans les Maremmes de Toscane.

tera en définitive du peroxyde de fer, du sulfate de chaux et la mise en liberté d'une certaine quantité d'acide carbonique, comme l'indique la formule

$$4(FeS^2)+8(CaO,CO^2)+30O=8(CaO,SO^3)+2(Fe^2O^3)+8(CO^2).$$

Résumé.

En résumé, toutes les réactions qui tendent à modifier la composition de l'air peuvent se classer comme il suit :

1°. *Causes qui tendent à augmenter la proportion d'acide carbonique contenue dans l'air.*

a. Sans diminuer la proportion d'oxygène libre.	*b*. En diminuant la proportion d'oxygène.
L'émission des gaz en rapport avec les orifices volcaniques.	1°. La destruction des matières organiques contenues dans les terrains stratifiés (houilles, lignites, bitumes); 2°. La décomposition des pyrites de fer et des fers spathiques.

2°. *Causes qui tendent à diminuer la proportion d'acide carbonique.*

c. En mettant de l'oxygène en liberté.	*d*. Avec ou sans absorption d'oxygène.
1°. La formation des pyrites de fer; 2°. La formation des combustibles minéraux et la conservation de tous les débris organiques.	La décomposition des silicates des roches ignées.

3°. *Causes qui tendent à augmenter la proportion d'oxygène contenue dans l'air.*

e. Sans diminuer la proportion d'acide carbonique.	*f*. En diminuant la proportion d'acide carbonique. La formation des combustibles minéraux. La formation des pyrites de fer.

4°. *Causes qui produisent une diminution de l'oxygène contenu dans l'air.*

g. Avec formation d'acide carbonique.	*h*. Avec absorption d'acide carbonique.
1°. La destruction des matières organiques contenues dans les terrains. 2°. La décomposition des pyrites de fer et des fers spathiques.	La décomposition des silicates des roches ignées.

Les considérations qui précèdent établiront, je l'espère, que la décomposition et la reproduction de certaines espèces minérales fort abondantes à la surface du globe, correspondent à des modifications importantes dans la composition de l'air atmosphérique. Comme elles agissent en sens contraire les unes des autres, il est bien difficile de déterminer dès à présent quelle sera la résultante de leur action. On peut même présumer que toute augmentation un peu considérable dans la proportion d'un des éléments constitutifs de l'air ferait fonctionner avec plus d'intensité les causes d'absorption ou de précipitation de cet élément. Supposons, par exemple, qu'à la suite d'un cataclysme arrivé à la surface du globe, des orifices volcaniques aient projeté dans l'atmosphère une grande quantité d'acide carbonique. La vie organique un moment interrompue reprendrait son cours avec plus d'énergie qu'auparavant, grâce au carbone qu'elle trouverait abondamment dans l'air. Plus il y aurait de végétaux formés, plus il y en aurait de soustraits à la décomposition, plus il se produirait de pyrites de fer. La présence d'une grande quantité d'acide carbonique dans l'air déterminerait aussi une décomposition plus rapide des silicates. Toutes les causes de précipitation, de minéralisation du carbone, agiraient donc avec plus d'intensité.

Plusieurs circonstances tendent néanmoins à prouver qu'aux anciennes époques géologiques l'atmosphère était plus dense et plus riche en acide carbonique, et peut-être en oxygène, qu'à l'époque actuelle. A une plus grande pesanteur de l'enveloppe gazeuse devaient correspondre une plus forte condensation de la chaleur solaire, et des phénomènes atmosphériques d'une bien plus grande intensité. Les variations dans la nature de l'air ont été sans doute constamment en rapport avec les êtres organisés qui vivaient à chacune de ces époques. La composition de notre atmosphère est-elle arrivée à un état permanent d'équilibre? Il faudra sans doute bien des siècles pour obtenir

la solution de ce problème. Les moyens d'analyse que nous possédons sont maintenant assez précis pour que nous puissions léguer aux générations futures des éléments certains sur cette importante question.

II.

Recherches sur la décomposition des roches.

Ce travail est la suite des recherches que j'ai déjà exécutées sur la décomposition des minéraux de la famille des silicates. Il renferme les résultats de nouvelles analyses faites sur des roches en voie de décomposition. J'ai eu occasion déjà de signaler la haute importance, au point de vue géologique, de ce grand phénomène naturel. On sait, en effet, que toutes les roches dans lesquelles une espèce feldspathique entre comme élément constituant, se présentent souvent dans un état plus ou moins avancé de décomposition. Mais le changement du feldspath en kaolin était le seul fait de ce genre qui eût été étudié. Les faits que j'ai rassemblés dans ce Mémoire, comme ceux dont je m'étais occupé dans mon premier travail, concernent spécialement des roches qui renferment d'autres éléments décomposables que les espèces feldspathiques. J'ai pu en déduire le mode d'altération de ces silicates, et quelques conclusions générales sur l'ensemble de ces phénomènes dont la décomposition du feldspath n'est qu'un cas particulier.

Mais c'est surtout au point de vue géologique que cette étude présente de l'intérêt. L'examen des produits de la décomposition des roches ignées permet, en effet, d'établir une liaison précise entre la nature de ces roches et celle des terrains de sédiment. Elle conduit, en outre, à des notions qui me paraissent incontestables sur les rapports de cette classe de phénomènes avec les causes qui ont concouru, à

toutes les époques géologiques, à modifier la composition de l'air atmosphérique.

Les deux roches dont l'examen fait l'objet de ce travail, sont un trapp du Cornwall et un basalte des bords du Rhin. Les échantillons que j'ai examinés présentaient, sur le même morceau, la roche intacte et un passage à la partie altérée.

1°. *Roche de trapp, dite* grau-stone, *des environs de Saint-Austell* (Cornwall).

Cette roche, dont les échantillons ont été recueillis sur place par M. John Phillips, élève de l'École royale des Mines, est d'un gris noir, et présente, quand on l'examine au microscope ou avec une forte loupe, un mélange de cristaux blancs et de cristaux noirs ou d'un vert foncé. Des lamelles assez larges d'un noir foncé, mais sans forme cristalline bien distincte, apparaissent çà et là sur la surface de la roche. Sa densité, à 15 degrés, est de 2,93; elle n'agit pas notablement sur le barreau aimanté.

Cette roche paraît se décomposer aisément. Plusieurs des fragments qui m'ont été remis, et qui avaient été détachés de roches saillantes à la surface du sol, présentent à l'extérieur, sur 9 à 10 millimètres de profondeur, une matière d'un gris verdâtre, parsemée de points noirs, qui s'écrase entre les doigts, et qui est évidemment le produit de la décomposition de la roche. On trouve aussi à la partie supérieure des carrières dans lesquelles on exploite le *grau-stone*, une matière grisâtre, peu cohérente, tout à fait semblable, par son aspect, au produit de la décomposition de la roche.

J'ai analysé comparativement : α, le grau-stone non altéré; β, la matière altérée qui se trouve à la surface des échantillons; γ, la roche décomposée que l'on trouve à la partie supérieure des carrières.

Je n'entrerai dans aucun détail sur les procédés que j'ai suivis pour faire l'analyse de ces matières. Chacune d'elles a été analysée deux fois; la première par le carbonate de soude; la seconde par l'acide fluorhydrique, afin de pouvoir

déterminer la proportion des matières alcalines. Les procédés analytiques employés sont identiques à ceux que j'ai décrits dans mon premier travail sur la décomposition des roches.

α. Roche non altérée. — La roche non altérée a donné à l'analyse :

	1°. Par le carbonate de soude. Analyse sur 1gr,579.	1°. Par l'acide fluorhydrique. Analyse sur 1gr,788.	Moyenne.
Perte au feu.....	1,7	»	1,7
Silice.....	51,4	»	51,4
Alumine.....	15,9	15,7	15,8
Oxyde de fer (1).....	16,8	»	16,8
Oxyde de manganèse..	0,5	»	0,5
Oxyde de titane	0,7	»	0,7
Chaux.....	5,7	»	5,7
Magnésie.....	2,7	2,7	2,7
Potasse.....	»	1,6	1,6
Soude.....	»	3,9	3,9
			100,8

Dans une autre analyse, la roche porphyrisée a été attaquée pendant un quart d'heure par l'acide chlorhydrique bouillant. On a étendu d'eau et fait passer dans la liqueur un courant d'acide sulfureux, puis on a fait bouillir pour chasser l'excès de cet acide, évaporé à sec, repris par l'acide chlorhydrique et filtré. On a dosé l'acide sulfurique contenu dans la dissolution au moyen du chlorure de barium, ce qui a donné la proportion de peroxyde de fer qui existait dans la liqueur d'attaque. Les autres bases ont été déterminées comme à l'ordinaire.

Sur 1gr,665, le résidu insoluble dans l'acide chlorhydrique et la potasse liquide a été de 0gr,907. La matière dissoute, 0gr,753 ; eau, 0gr,018.

On a trouvé dans la partie attaquée, qui forme les 44 pour

(1) Le fer a été dosé à l'état de peroxyde.

100 du poids de la roche :

Silice	41,6
Alumine	13,8
Peroxyde de fer	5,8
Protoxyde de fer et de manganèse	21,9
Acide titanique	0,8
Chaux	7,8
Magnésie	3,7
Alcalis	4,3
	99,3

On voit, d'après ces résultats, que l'oxyde de fer, la chaux et la magnésie se trouvent en plus forte proportion dans la partie de la roche soluble dans les acides, que dans la roche elle-même. L'élément feldspathique de la roche se concentre dans le résidu insoluble dans l'acide chlorhydrique, bien qu'il s'attaque cependant très-notablement par cet acide, comme le prouvent l'alumine et les alcalis contenus dans la dissolution.

Les résultats qui précèdent montrent que l'oxyde de fer est contenu dans le grau-stone principalement à l'état de protoxyde. Si l'on admet que le résidu inattaqué par l'acide chlorhydrique ne renferme que du protoxyde de fer, la composition définitive de la roche deviendra :

		Oxygène.	
Perte au feu	1,7	»	
Silice	51,4	26,70	
Alumine	15,8	7,40	
Peroxyde de fer	2,5	0,75	
Protoxyde de fer	12,9	2,85	
Protoxyde de manganèse	0,5	0,10	
Oxyde de titane	0,7	0,30	15,20
Chaux	5,7	1,50	
Magnésie	2,7	1,00	
Potasse	1,6	0,30	
Soude	3,9	1,00	
	99,4		

On peut représenter assez exactement la composition de la roche trappéenne de Saint-Austell en la considérant comme un mélange de labrador et de pyroxène. On aurait en effet, dans le labrador, en supposant que toute l'alumine du trapp en fasse partie :

Oxygène de l'alumine..... ..	7,40	$6(SiO), Al^2O^3, RO$.
Oxygène de la silice..... ...	14,80	
Oxygène des bases à 1 atome d'oxygène.	2,47	

Il restera pour l'élément pyroxénique :

Oxygène de la silice.....	11,9	2
Oxygène des autres bases...	5,3	1

On voit que la composition du trapp de Saint-Austell se représente assez bien par un mélange de labrador et d'un bisilicate sans alumine, comme le pyroxène.

Ce résultat peut être mis en parallèle avec celui que M. Durocher a obtenu pour les trapps des îles Féroé (1). M. Durocher a trouvé dans les trapps des îles Féroé 9 à 10 pour 100 de magnésie et 1 pour 100 d'alcalis, tandis que la roche de Saint-Austell ne renferme que 2,7 pour 100 de magnésie, et contient 5,5 pour 100 d'alcalis. Cette faible proportion de magnésie ne permet pas d'admettre ici la présence d'un élément analogue au diallage ou à l'hyperstène, et par conséquent le trapp de Saint-Austell ne saurait être rapproché de celui des îles Féroé, dans lequel M. Durocher a indiqué ces deux minéraux.

La roche de trapp de Saint-Austell se fond presque complétement à un fort feu de dégourdi de porcelaine en une masse noire remplie de petites bulles.

β. *Examen de la partie décomposée.* — La partie extérieure de la roche qui vient d'être analysée est d'un gris un peu verdâtre ; sa désagrégation est facile. On distingue quelques petits cristaux noirs-verdâtres allongés au milieu d'une masse blanchâtre. La roche est altérée sur 12 à 15 millimè-

(1) *Annales des Mines*, 3e série, tome XIX, page 47.

tres de profondeur. La partie décomposée se distingue nettement du reste de la roche par sa couleur et la facilité avec laquelle elle se désagrége.

Exposée à la chaleur du dégourdi de porcelaine en même temps que le trapp non altéré, la matière β se ramollit, mais les morceaux conservent à peu près leur forme. La fusibilité de la roche altérée est notablement moindre que celle de la roche elle-même.

La roche altérée ne s'attaque pas par les acides étendus et à froid. Les acides concentrés l'attaquent notablement.

J'ai fait deux analyses de la matière β, l'une au moyen du carbonate de soude, l'autre par l'acide fluorhydrique. En voici les résultats :

	1°. Par le carbonate de soude. Analyse sur 1gr,430.	2°. Par l'acide fluorhydrique. Analyse sur 1gr,518.	Moyenne.
Perte au feu (eau)....	8,8	»	8,8
Silice.....	42,6	»	42,6
Alumine...	19,8	20,3	20,1
Peroxyde de fer (1)...	22,0	21,6	21,8
Oxyde de manganèse..	0,5	0,5	0,5
Oxyde de titane.... .	0,6	»	0,6
Chaux.....	1,0	»	1,0
Magnésie.....	2,8	»	2,8
Potasse.....	»	0,9	0,9
Soude.....	»	1,9	1,9
			101,0

γ. *Examen du trapp altéré.* — Cette matière se trouve à la partie supérieure des carrières dans lesquelles on exploite la roche de trapp qui fournit des matériaux très-estimés pour l'entretien des routes. Son aspect est tout à fait le même que celui de la matière altérée β. La seule dif-

(1) La proportion relative des deux oxydes n'a pas été déterminée. Le fer a été dosé à l'état de peroxyde.

férence à faire remarquer tient à la présence, dans ce nouveau produit de la décomposition de la roche trappéenne, de veinules d'hydroxyde de fer qui lui donnent çà et là un aspect ocreux.

Deux analyses de cette roche décomposée, qui occupe toute la partie supérieure des carrières de trapp, ont donné en moyenne :

Eau	8,6
Silice	44,5
Alumine	22,1
Peroxyde de fer et oxyde de manganèse	17,6
Chaux	1,4
Magnésie	2,7
Oxyde de titane	1,0
Potasse	1,2
Soude	1,7
	100,8

1gr,638 de la même roche ont été traités par l'acide chlorhydrique, afin de déterminer la proportion des produits solubles et les proportions relatives du protoxyde et du peroxyde de fer. Les matières dissoutes successivement par l'acide chlorhydrique et par la potasse liquide forment les 68,3 pour 100 du poids total de la roche, et sont composés (abstraction faite de l'eau) de :

Silice	48,3
Alumine	19,7
Peroxyde de fer	6,2
Protoxyde de fer et oxyde de manganèse	16,5
Chaux	2,3
Magnésie	3,4
Alcalis	2,4
	98,8

Le résidu de l'attaque, après le traitement par l'acide chlorhydrique et par la potasse, est d'un blanc jaunâtre sans points noirs. Il forme les 31,7 pour 100 du poids de la

roche, et doit être composé de :

		Oxygène.
Silice	49,1	25,5
Alumine	32,4	15,1
Protoxyde de fer	8,3	1,8
Magnésie	2,3	0,9
Alcalis	4,8	1,0
Oxyde de titane	3,1	»
	100,0	

On voit que l'oxyde de fer, la chaux et la magnésie se trouvent en proportions notablement plus fortes dans la portion attaquée par l'acide que dans la roche elle-même. L'alumine et les alcalis se concentrent au contraire dans le résidu insoluble dans l'acide chlorhydrique. Il en a été de même, ainsi que je l'ai déjà fait remarquer plus haut, quand on a comparé la composition du trapp non altéré (α) à celle de la portion attaquée par l'acide chlorhydrique.

Nous pouvons maintenant comparer la composition de la roche non altérée (α) à celle des produits de son altération β et γ. Nous ferons cette comparaison en rapportant, comme je l'ai fait dans mon précédent travail, tous les éléments à une même proportion d'alumine, représentée par 100. On trouve ainsi :

	Trapp non altéré. α.	Trapp altéré. β.	Trapp altéré. γ.
Alumine	100	100	100
Silice	325	212	201
Chaux	36	5	6
Magnésie	17	14	12
Oxyde de fer	106	107	79
Oxyde de manganèse	3	2	
Potasse / Soude	33	14	13
Eau	11	43	38
	631	497	449

On voit que la décomposition du trapp lui a déjà fait perdre plus du tiers de la silice, les $\frac{5}{6}$ de la chaux, la moitié des alcalis qu'il renferme; une certaine quantité d'eau entre dans la constitution de la roche.

Les matières γ et β qui résultent toutes deux de la décomposition de la roche trappéenne, présentent à peu près la même composition, à l'exception pourtant de l'oxyde de fer. Les proportions d'oxyde de fer rapportées à la même quantité d'alumine sont bien les mêmes en α et en β, ce qui prouve que l'oxyde de fer n'a pas été entraîné dans la décomposition. Mais la roche altérée γ en renferme notablement moins que le trapp α. Une portion notable du fer a donc disparu par le fait de la décomposition. Les taches, les veinules ocreuses dont j'ai signalé la présence dans la roche altérée γ, montrent clairement qu'une partie du fer a pu être entraînée en dissolution, probablement sous l'influence d'acides organiques. J'ai signalé des faits analogues, plus prononcés même, dans mon précédent travail sur la décomposition des roches. Des réactions semblables ont été observées par M. Daubrée (1).

On voit, d'après la forte proportion d'alcalis qui reste dans la roche altérée, que l'élément pyroxénique du trapp paraît se décomposer avant l'élément feldspathique.

Les terres végétales qui reposent sur la roche de graustone sont, dans les environs de Saint-Austell, beaucoup plus fertiles que celles qui reposent sur le gneiss ou sur la grauwacke. Cette circonstance tient sans doute à la composition complexe et à la grande altérabilité de la roche trappéenne qui fournit aux végétaux, en se décomposant, la plupart des éléments minéraux qui doivent entrer dans leur constitution.

2°. *Basalte de Linz* (bords du Rhin).

Cette roche, dont les échantillons m'ont été remis par

(1) *Annales des Mines*, tome X, page 37.

M. l'ingénieur des mines Rivot, s'altère en prenant la forme de boules qui se décomposent sur toute leur surface, tandis que le centre est encore à l'état naturel. Le basalte non altéré est noir, à cassure conchoïde. On y distingue des nids de péridot, des cristaux de pyroxène et des lamelles incolores de très-petite dimension qui constituent l'élément feldspathique de la roche. Il agit fortement sur l'aiguille aimantée. Sa densité a été trouvée de 2,91 à 15 degrés.

Il fond en une masse scoriforme, un peu bulleuse, à un fort feu de dégourdi de porcelaine.

La partie extérieure des boules est d'un gris clair. En l'examinant à la loupe, on reconnaît qu'elle se compose d'une pâte blanchâtre au milieu de laquelle sont disséminés une foule de petits cristaux d'augite noirs et allongés. Les grains de péridot sont encore bien distincts au milieu de la matière altérée, mais ils sont devenus un peu ocreux, et plusieurs des cellules qui les renferment sont en partie vides, ce qui prouve que le péridot n'a laissé qu'un très-faible résidu dans sa décomposition.

On reconnaît aisément, à l'examen de la partie extérieure des boules, que la décomposition n'est point encore complète. Bien que la désagrégation de cette matière altérée soit beaucoup plus facile que celle de la roche elle-même, elle n'a point encore pris l'état terreux qui caractérise la dernière période de la décomposition.

Exposée au même feu que le basalte, dans le dégourdi du four à porcelaine, la matière grise ne se fond pas : les fragments se soudent les uns aux autres, mais sans déformation sensible. La masse devient noire. La fusibilité de cette substance est donc notablement moins facile que celle du basalte non altéré.

J'ai analysé séparément la partie centrale et la partie extérieure des boules du basalte de Linz.

α. *Basalte non altéré.* — Le basalte non altéré a donné

dans deux analyses :

	1°. Par le carbonate de soude. Analyse sur 1gr,774	2°. Par l'acide fluorhydrique. Analyse sur 1gr,834	Moyenne.	Oxygène.
Perte au feu... ...	2,4	»	2,4	»
Silice.....	45,9	»	45,9	23,8
Alumine	16,2	»	16,2	7,6
Protoxyde de fer.....	13,0	»	13,0	2,9
Oxyde de manganèse..	0,3	»	0,3	»
Oxyde de titane.....	1,0	»	1,0	»
Chaux.....	10,3	»	10,3	2,9
Magnésie.....	6,4	6,1	6,3	2,5
Potasse.....	»	1,2	1,2	0,2
Soude.....	»	3,6	3,6	0,9
			100,2	

On peut représenter approximativement le basalte, d'après l'analyse précédente, par :

54 de labrador 6 (Si O) $Al^2 O^3$, (KO. Na O. Ca O).
24 de pyroxène 2 (Si O) (Ca O), (Fe O. Mg O).
10 de péridot (Si O) (Fe O, Mg O).
10 de fer oxydulé titanifère.
2 d'eau.

β. *Basalte altéré.* — L'analyse de la partie extérieure des boules a donné les résultats suivants :

	1°. Par le carbonate de soude. Analyse sur 1gr,791.	2°. Par l'acide fluorhydrique. Analyse sur 1gr,722.	Moyenne.
Eau.....	6,7	»	6,7
Silice.....	43,2	»	43,2
Alumine.....	19,2	18,6	18,9
Protoxyde de fer.....	14,7	14,6	14,6
Oxyde de manganèse... ..	0,3	0,4	0,3
Chaux.....	8,4	8,0	8,2
Magnésie.....	5,8	5,4	5,6
Oxyde de titane.	1,3	1,2	1,2
Potasse.....	»	0,5	0,5
Soude.....	»	1,4	1,4
			100,6

Comparons ces résultats à ceux fournis par la roche non altérée, en rapportant toujours les éléments à 100 d'alumine, nous trouverons :

	Basalte non altéré. α.	Basalte altéré. β.
Alumine	100,0	100,0
Silice	283,0	228,0
Chaux	63,0	43,0
Magnésie	39,0	29,0
Oxyde de fer et de manganèse	80,0	78,0
Acide titanique	6,0	6,0
Potasse	7,4	2,6
Soude	22,2	7,4
Eau	15,0	35,0
	615,6	529,0

On voit, par le rapprochement qui précède, que le basalte, dans cette première période de la décomposition, a perdu une portion notable de la silice, de la chaux, de la magnésie et des alcalis qu'il renfermait. Les $\frac{2}{3}$ des alcalis ont déjà disparu, ce qui prouve que la décomposition de l'élément feldspathique est fort avancée. Une certaine quantité d'eau est entrée dans la constitution de la roche.

Les matières enlevées au basalte par la décomposition ont la composition suivante :

		Oxygène.	
Silice	55,0	28,60	
Chaux	20,0	5,70	
Magnésie	10,0	4,00	
Oxyde de fer	2,0	0,40	
Potasse	4,8	0,82	4,62
Soude	14,8	3,80	
	106,6		

Le rapport de l'oxygène de la silice à l'oxygène des alcalis est d'environ 6 à 1, tandis que dans la transformation de l'orthose en kaolin, la silice et la potasse qui se séparent

renferment des quantités d'oxygène qui sont entre elles dans le rapport de 9 à 1. Ajoutons que la silice qui s'est séparée dans la décomposition du basalte, ne provient pas en totalité du labrador. Le pyroxène et le péridot perdent, en effet, en se décomposant, la majeure partie, si ce n'est la totalité de leur silice, ainsi que je l'ai montré précédemment. Les proportions de silice et d'alcali, qui se séparent dans la décomposition du labrador, renferment donc des quantités d'oxygène dont le rapport est certainement moindre que celui de 6 à 1.

Les résultats qui précèdent confirment très-nettement ceux obtenus dans mon précédent travail. Ils montrent que les éléments entraînés sous l'influence des agents atmosphériques, dans la décomposition de la roche, ne sont pas seulement les alcalis et de la silice, mais que la magnésie, la chaux, l'oxyde de fer peuvent être également enlevés d'une manière plus ou moins complète, suivant les circonstances qui ont accompagné cette décomposition. On trouve également, comme résultat général, que l'alumine et l'eau sont toujours en proportion plus forte dans le résidu de la décomposition que dans la roche non altérée. Ce résidu tend à se rapprocher de plus en plus d'un silicate d'alumine hydraté, d'une argile.

Je ne me suis point occupé dans ce travail, non plus que dans le précédent, de déterminer les causes premières de l'altération des roches plutoniques. Les importants travaux de M. Becquerel et ceux de M. Alexandre Brongniart sur le gisement des kaolins, sont bien connus des savants. Mon but principal a été de comparer, à l'aide de l'analyse chimique, la composition des résidus de la décomposition à celle de la roche non altérée, et d'en déduire, abstraction faite de toute considération sur les causes premières de l'altération, la nature et la proportion des éléments qui disparaissent. Les corps qui se séparent ainsi de la roche sont entraînés en

dissolution dans les eaux qui filtrent constamment à travers le sol.

On avait admis jusqu'à ces derniers temps que la décomposition des silicates naturels alcalifères était due à la solubilité dans l'eau du silicate alcalin qui se séparait. Pour l'orthose 12 (Si O), $Al^2 O^3$, K O, on explique la formation du kaolin 3 (Si O), $Al^2 O^3$ par l'entraînement, au moyen de l'eau, d'un silicate 9 (Si O), K O formant la limite extrême des combinaisons solubles. Nous avons vu plus haut que, dans la décomposition du labrador, la silice se trouve en proportion bien moindre par rapport aux alcalis dans les matières entraînées. Les recherches contenues dans ce travail montrent que la chaux, la magnésie, l'oxyde de fer sont entraînés en même temps que la silice, quelquefois même avant les alcalis, dans la décomposition de la roche. Le pyroxène, le péridot peuvent disparaître complétement par la dissolution de tous leurs éléments. L'entraînement de la silice paraît donc être tout à fait indépendant de la présence des alcalis.

Les circonstances de la décomposition des roches de trapp et de basalte dont je viens de parler étant tout à fait les mêmes que celles relatives aux roches dont je me suis occupé dans mon précédent travail, il serait sans intérêt de reproduire ici les considérations que l'on peut en déduire sur les actions chimiques qui contribuent à la décomposition, et sur l'état de combinaison des éléments qui disparaissent. L'acide carbonique et l'oxygène en dissolution dans les eaux qui filtrent à travers le sol, la décomposition des matières organiques ou l'action des matières organiques vivantes, les phénomènes de la nitrification, me paraissent être les agents principaux qui déterminent l'entraînement de la silice et des bases solubles. Je me contente d'indiquer ces considérations qui ont été développées avec détail dans le précédent Mémoire.

Les résultats généraux de ces recherches établissent un

lien précis entre la composition chimique des roches d'origine ignée et celle des terrains formés par voie aqueuse. On voit, en effet, toutes les roches plutoniques produire un résidu argileux par leur décomposition. Le feldspath des granits se change en kaolin; pour les autres roches que j'ai examinées, on voit de même l'alumine se concentrer dans le résidu de la décomposition en retenant de la silice et fixant de l'eau, tandis que les autres éléments sont entraînés en dissolution. On peut donc poser comme principe général que toutes les roches ignées renfermant de l'alumine, laissent par leur décomposition un résidu argileux plus ou moins pur, plus ou moins mélangé de quartz, d'oxyde de fer, etc., suivant la nature de la roche, et suivant les circonstances dans lesquelles son altération a eu lieu.

Si maintenant on considère que presque toutes les roches d'origine ignée sont sujettes à la décomposition sous les influences atmosphériques; que cette décomposition continue à s'opérer de nos jours sur une grande partie de nos continents (1); si l'on remarque que les blocs d'une grande hauteur restés en place sans altération sont des témoins qui attestent l'épaisseur de la roche désagrégée et entraînée par les eaux, et par conséquent toute l'importante géologique du phénomène; si l'on considère enfin que certaines roches, non sujettes à la décomposition, conservent depuis des milliers d'années l'impression des stries formées à leur surface par d'anciennes érosions, on en conclura que la destruction des terrains d'origine ignée est toujours précédée ou accompagnée de la décomposition des silicates qui les constituaient, et par conséquent de la formation des matières argileuses.

---

(1) Les citations de roches ignées en décomposition reviennent à chaque page dans le texte descriptif de la carte géologique de France, par MM. Dufrénoy et Elie de Beaumont. *Voyez* notamment les pages 116, 123, 160, 184, 200, 306, etc., du tome Ier.

On peut faire remarquer aussi que l'on ne rencontre que par exception, dans les terrains stratifiés, des silicates à plusieurs bases analogues à ceux des roches plutoniques, tandis que le silicate d'alumine hydraté, l'argile, en forme la partie principale. Toutes les argiles enfin renferment, comme M. Mitscherlich l'a prouvé, des quantités notables d'alcali qui prouvent leur communauté d'origine avec le kaolin. N'est-il pas démontré par toutes ces considérations que l'argile des terrains stratifiés provient en totalité de la décomposition des roches plutoniques. La facilité avec laquelle la roche amenée ainsi à l'état terreux a pu se délayer dans les eaux pluviales explique très-simplement son entraînement par voie mécanique, jusque dans les bassins, marins ou lacustres, où les matières se sont déposées.

On chercherait en vain une autre origine aux masses argileuses des terrains stratifiés : personne ne peut voir dans ces matières le résultat d'une simple désagrégation des roches ignées. Elles diffèrent de celles-ci par leur composition chimique moins complexe, par l'eau qu'elles renferment en combinaison, par leurs propriétés physiques, leur plasticité, leur infusibilité. On ne peut supposer non plus que les matières argileuses sont sorties du sein de la terre, soit à l'état solide à la manière des produits des éruptions boueuses, soit en dissolution dans les eaux minérales. A l'exception de la décomposition des roches feldspathiques, on ne connaît aucune réaction qui puisse produire, à l'époque actuelle, des composés analogues à l'argile. Les eaux minérales n'ont pas maintenant une grande importance géologique, et de plus, il est essentiel de remarquer qu'on ne trouve jamais, ou qu'on ne trouve que des traces très-faibles d'alumine, dans leur composition. On ne saurait donc voir dans les eaux minérales l'origine de matières aussi chargées d'alumine que le sont les argiles. La production des eaux minérales me paraît au contraire un fait qui se lie intimement à la décomposition des roches ignées.

Les eaux alcalines qui sont chargées à la fois de bicarbonates, d'acide carbonique libre et de silice, renferment en effet tous les éléments que la décomposition enlève aux roches plutoniques, comme les alcalis, la chaux, la magnésie, quelquefois le protoxyde de fer. Ces actions chimiques s'exercent dans la profondeur comme à la surface du globe et elles doivent amener des changements très-remarquables dans la composition et la texture des roches sur lesquelles elles s'exercent.

Je ne saurais donc voir, dans l'argile des terrains stratifiés, autre chose que le produit de l'entraînement mécanique des résidus de la décomposition des roches plutoniques. On conçoit du reste toutes les variétés que doivent présenter ces couches dans leur composition et leur nature. En effet, les eaux qui entraînent l'argile en suspension enlèvent en même temps d'autres matières de grosseur et de densité différentes qui peuvent se mêler avec les dépôts argileux, comme le sable, le mica, etc. Ces dépôts mécaniques se mélangeront forcément avec les autres corps qui se précipiteront chimiquement dans le même bassin, comme la silice qui a été dissoute dans la décomposition des silicates, les carbonates de chaux et de magnésie, l'oxyde de fer, etc. L'explication que je présente me paraît satisfaire d'une manière tout à fait simple à toutes les conditions du problème.

Il est un autre ordre de considérations qui se lie intimement aux recherches précédentes et sur lequel je dois appeler l'attention. Personne n'a jamais pensé à signaler ce grand phénomène de la décomposition des roches comme une des causes actives, permanentes, de l'altération de l'air atmosphérique. Il est facile cependant de montrer qu'il doit en être ainsi. La décomposition des roches ignées tend à déterminer la précipitation, la minéralisation de l'acide carbonique et de l'oxygène.

Le fer est contenu en effet à l'état de protoxyde dans les roches ignées; la décomposition le transforme en peroxyde

au moyen de l'oxygène de l'air. Les roches pyroxéniques et amphiboliques condensent ainsi, en se décomposant, de fortes proportions d'oxygène.

La précipitation de l'acide carbonique résultant de la décomposition des roches est un phénomène d'une bien plus grande importance. Commençons d'abord par bien constater que toute décomposition des roches plutoniques, sous l'influence des agents atmosphériques, est accompagnée de l'absorption d'une quantité correspondante d'acide carbonique, quelles que soient du reste les causes premières de l'altération de la roche.

Nous avons vu des silicates sans alcali, le péridot, le pyroxène, perdre leur silice, par la décomposition, d'une manière beaucoup plus complète que le feldspath, et nous avons dû en conclure que l'entraînement de la silice pouvait être tout à fait indépendant de la présence des alcalis. Mais, en supposant même qu'il se sépare du silicate de potasse en solution dans l'eau, il est évident que cette combinaison de silice et d'alcali sera immédiatement décomposée par l'acide carbonique, soit à l'air libre, soit à quelque profondeur au-dessous du sol. Nous savons, en effet, que l'acide carbonique décompose immédiatement les silicates solubles avec formation de bicarbonates et de silice qui ne se sépare qu'autant que la solution est concentrée. Nous savons de plus que la silice ne décompose pas, par la voie humide, les carbonates alcalins, puisqu'en évaporant à siccité une dissolution contenant des bicarbonates alcalins et de la silice, on n'obtient jamais qu'un mélange de silice et de carbonates neutres; la silice se trouve cependant ici dans les circonstances les plus favorables pour rentrer en combinaison, l'excès d'acide carbonique disparaissant par le fait de l'évaporation à siccité. Nous devons en conclure, à plus forte raison, que des silicates alcalins ne peuvent pas exister en présence de l'acide carbonique qu'on rencontre en proportion notable dans toutes

les eaux qui ont filtré à travers le sol. On peut ajouter encore que les eaux thermales alcalines, dont l'origine est bien certainement en relation avec des roches plutoniques en décomposition à une certaine profondeur au-dessous du sol, ne renferment que des bicarbonates et de la silice, jamais de silicates.

En considérant, au contraire, l'acide carbonique comme l'agent de la dissolution des matières enlevées à la roche, on satisfait aisément à tous les faits observés. La silice est sensiblement soluble dans l'eau pure, dans l'eau chargée d'acide carbonique, et surtout dans l'eau contenant des carbonates alcalins. La chaux et la magnésie se dissolvent aussi très-facilement dans l'eau chargée d'acide carbonique; l'alumine, au contraire, ne s'y dissout pas notablement. On conçoit donc aisément que cet agent puisse entraîner en dissolution tous les éléments que la décomposition sépare des roches.

La formation des carbonates, dans les circonstances qui viennent d'être indiquées, détermine une perte d'acide carbonique pour l'atmosphère. Les carbonates alcalins rencontreront, soit dans les eaux douces, soit dans la mer, des sels solubles à base de chaux et de magnésie, et produiront, en définitive, des carbonates de ces deux bases qui se déposeront à leur tour, spontanément ou par l'intermédiaire des zoophytes ou des mollusques. Les bases, qui tout à l'heure se trouvaient combinées à la silice dans les roches ignées, ont précipité de l'atmosphère une proportion équivalente d'acide carbonique.

Appliquons ce résultat à la décomposition du feldspath orthose. Ce minéral contient 17 pour 100 de potasse qui doivent absorber 7,8 pour 100 du poids de l'orthose en acide carbonique. Or, la densité de l'orthose étant 2,5 environ, on voit que 1 mètre cube de ce minéral absorbe, en se décomposant complétement, 195 kilogrammes d'acide carbonique. La pression due à l'acide carbonique dans l'air

n'étant que de $1^k,24$ (1) par mètre carré de surface, il en résulte qu'il suffirait de la décomposition complète de moins de $0^m,007$ d'épaisseur d'orthose pour absorber la totalité de l'acide carbonique contenu dans l'atmosphère, si cette décomposition s'opérait à la fois sur toute la surface du globe. En réduisant la surface sur laquelle la décomposition s'opère à $\frac{1}{20}$ de celle de la terre, on voit qu'il suffirait de $0^m,14$ d'épaisseur de feldspath décomposé pour déterminer la complète absorption de l'acide carbonique de l'air. Si l'on considère la grande facilité avec laquelle certaines roches se décomposent sous nos yeux, si l'on fait attention que les roches granitiques se présentent souvent décomposées dans des monuments construits par les hommes, on arrivera à cette conclusion, que la décomposition des roches plutoniques doit amener inévitablement, *au bout d'un temps assez court*, une diminution très-considérable dans la proportion d'acide carbonique contenue dans l'atmosphère.

On objectera peut-être à ce résultat que les bases enlevées par la décomposition aux silicates des roches ignées, peuvent être entraînées en combinaison avec des acides plus forts que l'acide carbonique, à l'état de nitrates, par exemple, ou en combinaison avec des acides organiques. Je ferai remarquer d'abord que les nitrates n'ont jamais été signalés dans les eaux d'aucune mer ou d'aucun lac, bien que ces sels se forment journellement à la surface du globe et qu'ils doivent être, en raison de leur grande solubilité, facilement entraînés dans le réservoir commun. Ce résultat montre que les nitrates se décomposent dans les eaux de la mer sous l'influence de matières organiques vivantes ou en décomposition. S'il n'en était pas ainsi, cette formation continue des nitrates ferait perdre rapidement à l'atmosphère son oxygène et une partie de son azote. M. Kuhlmann, auquel on doit des recherches sur l'emploi des

(1) En admettant $\frac{4,5}{10.000}$ en poids d'acide carbonique dans l'air, d'après les recherches de M. Boussingault et Lewy.

nitrates dans l'agriculture, a montré que ces sels se décomposent sous l'influence des matières organiques; les nitrates de chaux et de magnésie donneront donc finalement des carbonates de ces bases.

Les mêmes considérations s'appliquent aux combinaisons salines formées par les acides organiques. Ces sels finissent généralement par donner des carbonates sous l'influence prolongée de l'air et de l'eau.

Si les argiles des terrains stratifiés proviennent en totalité de la décomposition des roches feldspathiques, ainsi que cela peut paraître démontré par les considérations présentées plus haut, on en déduit rigoureusement cette conclusion, que leur formation a dû précipiter de l'atmosphère des quantités immenses d'acide carbonique (1). On trouve, par un calcul simple, qu'elles représentent plus de cent mille fois la quantité qui existe aujourd'hui. Un tel résultat est fait pour effrayer l'imagination, et cependant il est une conséquence rigoureuse d'expériences précises et de notions scientifiques que je crois incontestables.

Je ne prétends nullement que l'immense proportion d'acide carbonique indiquée plus haut ait fait partie à la fois de l'atmosphère terrestre. Le résultat que j'ai signalé me paraît pouvoir s'expliquer d'une manière beaucoup plus simple, et qui n'exige pas que l'air ait eu, aux diverses époques géologiques, une composition *très-différente* de celle qu'il présente aujourd'hui.

Je vois dans les phénomènes volcaniques la principale cause qui restitue à l'atmosphère l'acide carbonique que la décomposition des roches en précipite. M. Boussingault a

(1) Supposons que l'argile provienne de la décomposition de l'orthose : l'orthose 12 (SiO^3, Al^2O^3, KO laisse 3 (SiO^3, Al^2O^3 d'argile qui représente à l'état anhydre les 48 pour 100 du poids du feldspath. Pour une épaisseur moyenne de 500 mètres d'argile sur toute la surface du globe, on trouve que la formation de cette quantité d'argile aura déterminé la précipitation par mètre carré de plus de 150,000 kilogrammes d'acide carbonique ou 125,000 fois la quantité qui existe actuellement dans l'air.

constaté que les gaz qui se dégagent du sol, auprès des volcans des Andes, étaient presque uniquement formés d'acide carbonique. Les environs du Vésuve, de l'Etna, le laissent dégager en grande quantité. Les volcans éteints exhalent tous par le sol lui-même ou par les sources thermales qui indiquent la dernière période de leur activité, des torrents d'acide carbonique. M. de Humboldt (1) signale ce gaz comme étant le seul produit des volcans quand ils se refroidissent. Quelle est l'origine de ces dégagements d'acide carbonique? Ce gaz proviendrait-il de la décomposition de carbonates à de grandes profondeurs, sous l'influence de roches siliceuses et d'une haute température, et son dégagement serait-il par conséquent un produit nécessaire de la formation des laves? ou bien l'acide carbonique serait-il dissous dans les matières en fusion qui existent dans le sein de la terre, comme l'oxygène est dissous dans la litharge ou dans l'argent fondus, comme l'air est dissous dans l'eau, pour s'en séparer au moment de la solidification? Cette vue ingénieuse, qui appartient à M. Elie de Beaumont, montrerait la partie fluide du globe terrestre comme un immense réservoir d'acide carbonique, d'où le gaz se dégagerait au fur et à mesure des progrès de la solidification.

Quoi qu'il en soit de l'origine de l'acide carbonique émis par les volcans, il est certain que c'est là un phénomène considérable dont on conçoit que les effets puissent contrebalancer les résultats de l'absorption du même gaz dans la décomposition des roches. Ces faits font ressortir la liaison intime que tous les grands phénomènes de la nature ont les uns avec les autres. La chaleur centrale de la terre, cause première de toutes les actions volcaniques, paraît indispensable à l'entretien de la vie organique à sa surface. Telle est la conclusion à laquelle on est amené par les résultats de ce travail. Supprimez les phénomènes volcaniques, et bientôt l'acide carbonique de l'air aura disparu. Cette vie

(1) *Cosmos*, tome I, page 281, traduction de M. Faye.

intérieure du globe terrestre, rendue manifeste par les mouvements de sa croûte solide, par les déchirements du sol, par ces violentes éruptions de gaz et de matières en fusion, serait une des conditions essentielles du maintien de la vie à sa surface. Ces rapprochements présentent, ce me semble, un intérêt particulier. Quand Saussure eut démontré par ses belles expériences, cette admirable loi de la nature, en vertu de laquelle le carbone passe de l'atmosphère dans les végétaux pour être bientôt restitué à l'état d'acide carbonique, soit par leur décomposition, soit par les animaux qui s'en nourrissent, on crut que cette rotation du carbone assurait la permanence de la composition de l'air atmosphérique. On voit maintenant qu'il faut faire intervenir dans la solution de la question des phénomènes d'un tout autre ordre, et que les éléments minéraux de la croûte terrestre concourent aussi, par des réactions inverses les unes des autres, à la production de cet équilibre.

J'ai examiné avec quelque détail, dans mon précédent Mémoire, d'autres actions chimiques qui s'exercent entre les éléments de l'atmosphère et les matériaux de la croûte solide du globe. Je me contente de les signaler ici de nouveau, sans prétendre qu'elles embrassent toutes les réactions des roches sur l'atmosphère.

J'ai insisté sur les considérations qui précèdent, convaincu que la recherche et la découverte des causes qui lient les formations géologiques à la composition de l'air atmosphérique, sont de la plus haute importance pour l'histoire du globe. Rien ne nous prouve en effet que notre atmosphère ait eu à toutes les époques la même composition qu'à présent. Les belles recherches de M. Adolphe Brongniart, sur la flore houillère, ont conduit tous les géologues à admettre, avec cet illustre botaniste, l'existence dans l'atmosphère, à cette époque, d'une proportion d'acide carbonique supérieure à celle que l'on y trouve actuellement. Tout porte à penser qu'il y a une relation nécessaire entre

la nature des végétaux et des animaux, et la composition du milieu dans lequel ils vivent. La permanence dans les proportions relatives des éléments de l'air, serait intimement liée à la permanence des formes organiques à la surface du globe, et chacune des créations diverses dont nous retrouvons les débris fossiles, aurait été destinée à vivre dans une atmosphère particulière. Un pareil sujet conduirait à des spéculations sans fin. Rien n'établit que les causes variées qui tendent à modifier la composition de l'air aient en ce moment une résultante nulle. Les travaux de précision sur la composition de l'air, que l'on a exécutés depuis quelques années, fourniront certainement à la science des documents très-précieux pour la solution de cette question. Je crois qu'il y aurait un très-grand intérêt à déterminer la quantité d'acide carbonique contenue dans l'air en divers lieux, à diverses hauteurs, dans des conditions variées de saisons, de températures, de directions des vents, en prenant pour base les expériences si précises exécutées déjà par MM. Boussingault et Lewy (1). La fixation de ces nombres fournirait à l'histoire naturelle du globe une donnée des plus importantes pour le présent et surtout pour l'avenir.

III.

Recherches sur les altérations des roches stratifiées par les agents atmosphériques et les eaux d'infiltration.

Les recherches que j'ai eu l'honneur de présenter à l'Académie dans deux Mémoires successifs sur la décomposition des silicates, concernaient particulièrement les roches cris-

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. X, p. 456 et 470.

tallisées. J'ai cherché à déterminer, par la comparaison des résultats des analyses de la roche à son état naturel et de la même roche décomposée, la nature et la proportion des éléments qui disparaissaient par le fait de la décomposition, ainsi que les causes qui avaient pu la produire. Il m'a paru qu'on pouvait arriver ainsi à établir des relations d'une grande netteté entre les roches d'origine ignée et celles qui, par leur stratification, par les débris organiques qu'elles renferment, accusent évidemment une origine aqueuse. J'ai fait voir enfin toute l'importance de ces phénomènes de décomposition qui se continuent encore à l'époque actuelle, au point de vue de l'influence qu'ils exercent sur la composition de l'atmosphère terrestre.

Les faits que j'ai rassemblés dans ce Mémoire s'appliquent spécialement aux terrains stratifiés. Les roches qui les constituent subissent aussi pour la plupart des modifications remarquables par l'influence des agents atmosphériques et par l'action des eaux d'infiltration. Leur aspect pétrographique varie en même temps que leur composition chimique. Le même phénomène, considéré plus en grand, me parait être la cause de changements importants survenus dans l'allure et l'inclinaison de certaines couches, postérieurement à leur dépôt.

Le sujet que j'essaye de traiter dans ce Mémoire est des plus vastes et exigera sans doute de longues recherches. J'espère montrer, par l'exposé de quelques faits, tout l'intérêt que présenterait, pour la géologie, l'étude des terrains entreprise dans cette nouvelle direction.

La première partie de ce travail s'applique aux dépôts gypseux. Les masses de gypse qu'on exploite dans diverses formations présentent, comme on sait, des conditions toutes particulières de gisement qui leur ont fait attribuer, dans un grand nombre de cas, une origine métamorphique. Les faits que j'ai rassemblés me paraissent démontrer, dans un grand nombre de cas, que ces apparences sont dues à l'ac-

tion prolongée des agents atmosphériques et des eaux d'infiltration.

J'indiquerai, dans la seconde partie de ce travail, plusieurs faits relatifs aux modifications qu'éprouvent des terrains calcaires soumis aux mêmes influences.

PREMIÈRE PARTIE.

Altérations des terrains gypseux.

Les gypses appartiennent, comme on sait, à un grand nombre de formations différentes. Les considérations qui suivent ne s'appliquent qu'aux gisements de cette substance dans la formation secondaire du trias et dans le terrain tertiaire des environs de Paris.

Gypses du trias. — La plupart des exploitations de gypse de l'est de la France sont ouvertes dans la formation des marnes irisées qui constitue, comme on sait, l'étage supérieur du terrain désigné sous le nom de *trias*. Le gypse se rencontre à la base des marnes irisées. Il comprend en couches subordonnées les vastes dépôts de sel gemme qu'on a reconnus en Lorraine et en Franche-Comté. Il repose sur les couches de l'étage calcaire connu sous le nom de *muschelkalk*.

Le gypse des marnes irisées est exploité en plusieurs points du département de la Haute-Saône. On le rencontre ordinairement à la base de collines arrondies, souvent de forme conique, qui reposent sur des plateaux formés par le muschelkalk. Le sommet de la butte gypseuse est souvent occupé par les couches inférieures du lias.

Les buttes gypseuses triasiques présentent dans leur orographie une ressemblance remarquable avec les buttes gypseuses tertiaires des environs de Paris. Le gypse qui se trouve à la base de celles-ci repose sur des plateaux de calcaire grossier ou de calcaire siliceux, tandis que le sommet de la butte se trouve, comme à Montmartre, recouvert par un chapeau de grès supérieur ou de meulière.

Les gypses qu'on exploite à la base des buttes keupériennes sont ordinairement assez impurs. Ils sont mélangés d'argiles de diverses couleurs qui leur donnent souvent une texture zonée. Les circonstances de leur gisement ont été signalées déjà par plusieurs géologues, notamment par M. Élie de Beaumont, dans son travail devenu classique, sur les terrains secondaires du système des Vosges. Les masses de gypse qu'on exploite dans ces carrières, la plupart du temps à ciel ouvert, s'y présentent sous forme de blocs irréguliers, souvent désunis, entourés par des couches de marnes de diverses couleurs inclinées sous des incidences très-variables et qui semblent s'être moulées sur les protubérances de ces masses gypseuses. Ces apparences ont porté plusieurs géologues à considérer ces formations comme le résultat d'une modification chimique de certaines roches calcaires par l'émission de vapeurs acides émanées de l'intérieur de la terre. Il semble, en effet, qu'on ne puisse pas concevoir la formation d'amas discontinus et irréguliers, et la stratification contournée des couches marneuses à leur approche, dans l'hypothèse d'un dépôt régulier opéré au sein d'une masse liquide.

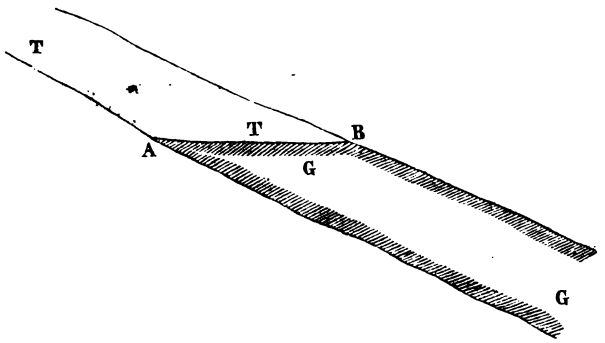
L'hypothèse d'une modification postérieure au dépôt est sujette elle-même à des objections très-graves. On peut concevoir que, dans le voisinage de roches ignées, et sous l'influence prolongée de vapeurs acides, des couches calcaires aient été transformées en gypse. Mais il faut remarquer que les gypses keupériens, dont nous nous occupons, ne sont nullement en rapport avec des roches ignées qui auraient percé le terrain. La stratification du terrain keupérien, prise dans son ensemble, est parfaitement concordante avec celle du muschelkalk et avec celle des terrains jurassiques qui le recouvrent. Tout ce système de couches se relève régulièrement, sous un angle de quelques degrés, vers la chaîne des Vosges. Les couches du muschelkalk conservent, dans le voisinage des buttes gypseuses, toute leur régularité de stra-

tification. On ne comprendrait pas comment les couches calcaires du muschelkalk, qu'on trouve partout sous le keuper, auraient pu être traversées par des dégagements de vapeurs acides, sans éprouver elles-mêmes des modifications profondes dans leur composition chimique.

L'une et l'autre des deux hypothèses qui précèdent sont donc sujettes à de graves objections. Les faits que je vais signaler me paraissent de nature à éclaircir beaucoup ce sujet.

Le terrain keupérien renferme, en Franche-Comté et dans le département des Vosges, une couche de combustible qui, par sa constance, est un très-bon horizon géologique. On exploite cette couche dans plusieurs concessions dans le département de la Haute-Saône. Son épaisseur dépasse rarement 1 mètre. Elle présente deux variétés de houille, l'une désignée sous le nom de *houille tendre,* ne renferme pas de gypse; l'autre, appelée *houille dure* ou *gypseuse,* a tous ses fragments cimentés les uns avec les autres par du gypse fibreux. La *fig.* 1 en présente une coupe. Les deux

Fig. 1.



variétés de houille sont exploitées dans les mêmes concessions, souvent au moyen du même puits. La houille tendre se compose de fragments très-peu adhérents, qui s'enlèvent

(1) *Légende de la* fig. 1. — T houille tendre; G houille gypseuse.

au pic avec la plus grande facilité. La houille dure ou gypseuse est d'une extraction difficile, qui exige l'emploi de la poudre. La houille tendre fournit beaucoup d'eau, tandis que la houille dure est complétement sèche. La houille tendre se présente toujours dans les parties voisines des affleurements ; la houille gypseuse, dans la profondeur. Le passage de la houille tendre à la houille gypseuse se fait brusquement, à 30 ou 40 mètres de profondeur au-dessous du sol : on peut l'observer dans plusieurs galeries des mines de Corcelles et de Gemonval. La couche de houille s'enfonce, au sud, sous un angle de 7 à 8 degrés. La séparation des deux espèces de houille se fait suivant un plan horizontal AB, de telle façon que la houille tendre vient se terminer en forme de coin sur la houille gypseuse. Les houilles tendres paraissent être évidemment le produit de l'altération des houilles gypseuses par les eaux d'infiltration. Le ciment gypseux qui réunissait les fragments du combustible a été enlevé jusqu'à la profondeur de 30 à 40 mètres au-dessous du sol. A une profondeur plus grande, la houille est constamment et uniformément gypseuse. On ne saurait douter que la couche de houille n'ait été, dans l'origine, cimentée tout entière par le gypse.

A une petite distance du sol, il y a toujours un intervalle assez considérable entre la houille et le gypse solide. Cet intervalle est rempli par des marnes diversement colorées, très-peu consistantes, et que la sonde traverse avec la plus grande facilité. Quand on arrive aux houilles dures, on trouve, au contraire, le gypse solide presque immédiatement au-dessous de la houille. On a même rencontré des veinules de gypse dans les argiles qui forment le toit de la couche, dans un sondage entrepris dans la concession de Gemonval, et qui a atteint la houille à 90 mètres de profondeur, après avoir traversé le calcaire à gryphées, le grès inférieur du lias, et toutes les couches supérieures du keuper.

Ainsi donc, quand la houille affleure près du sol, elle est séparée du gypse solide par un intervalle de 30 mètres environ d'un terrain marneux ou graveleux sans consistance (1). La houille gypseuse se trouve, au contraire, en contact direct avec le gypse. On peut déduire, ce me semble, de ce rapprochement, cette conséquence rigoureuse: que, dans l'origine, le gypse était partout en contact direct avec la couche de houille, et que l'intervalle qu'on rencontre actuellement vers les affleurements de cette couche, entre elle et le gypse solide, intervalle rempli par un terrain sans consistance, représente le résidu de la dissolution

---

(1) On a exploré, dans le département de la Haute-Saône, la partie inférieure du terrain keupérien, par un grand nombre de sondages dans l'espoir de rencontrer du sel gemme. Parmi les résultats de tous ces sondages, je choisis le suivant, qui m'a été communiqué par M. Cochet, directeur de la mine de Corcelles, et qui a été commencé précisément sur les affleurements de la couche de houille, sur le territoire de Crevans (Haute-Saône) :

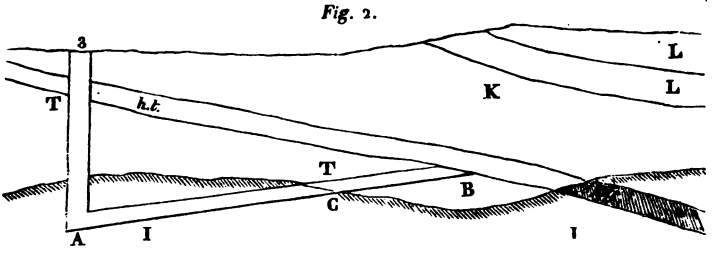
	m.
Grès et argiles de diverses couleurs; traces de houille.....	2,00
Grès et marnes grises, rouge foncé; grès avec fragments quartzeux; terrain sans consistance.....	16,00
Vide de.....	0,67
Marnes grises, mêlées de veines de gypse et d'argiles vertes, rouges et lie de vin.....	11,33
Gypse marneux gris, mêlé de petits bancs d'argiles irisées, légèrement salé.....	45,00
Gypse gris et blanc assez dur, alternant avec des bancs de marnes grises et vertes compactes (un peu plus salé que le précédent)...	8,00
Gypse gris et blanc dur, avec quelques bancs de marnes grises (continuation de salure).....	10,00
Gypse gris clair très-salé, avec quelques parties de sel gemme rouge.....	7,00
Gypse dur blanchâtre, mêlé de gypse laminaire, et de veines d'argile bleue (très-peu salé).....	5,00
Gypse dur gris et blanc, avec veines d'argile bleue (très-peu salé).....	9,50
Gypse bleu et gris très-dur.....	3,50
Calcaire argileux, rude au toucher, devenant de plus en plus dur (muschelkalk).....	2,50
Total.....	120,50

Terminé le 11 août 1839.

progressive des couches gypseuses par les eaux d'infiltration.

Ce terrain graveleux et désagrégé est éminemment perméable, tandis que le gypse solide ne l'est pas. Aussi rencontre-t-on toujours un niveau d'eau entre le gypse solide et le terrain. Je l'ai observé dans une galerie à travers bancs qui partait du fond du puits n° 3, à la mine de Gemonval, ainsi que la coupe *fig.* 2 le représente (1). Cette

Fig. 2.



galerie était commencée dans le gypse solide à 30 mètres de profondeur. Elle devait aller rejoindre la couche de houille sur son avalpendage. On a trouvé au point C la jonction du gypsé solide avec le terrain désagrégé qui le recouvre. Une source abondante se trouvait au contact, et le gypse se présentait là comme carié et rongé par le courant d'eau souterrain dont le lit devait aller sans cesse en s'approfondissant (2).

Si les travaux entrepris pour la recherche de la houille et du sel gemme n'avaient pas fait reconnaître cette grande épaisseur de couches gypseuses qui existent partout à la base du terrain keupérien dans le département de la Haute-Saône, on aurait pu croire que le gypse n'existait, dans ce

(1) *Légende de la* fig. 2. — L lias; *h t* houille tendre; *h g* houille gypseuse; K keuper; T terrain graveleux perméable; I gypse solide imperméable.

(2) Un fait analogue se remarque à Dieuze : dans la mine de sel gemme entre la première couche de sel et son toit, on trouve un petit vide dans lequel coule de l'eau saturée. Toutes les couches de sel inférieures sont complétement sèches.

terrain, qu'en amas isolés à la base des buttes où on l'exploite encore aujourd'hui. Partout, en effet, où la ligne de jonction du terrain keupérien avec le muschelkalk se trouve sur un terrain peu ondulé, il est évident que le terrain gypseux ne peut pas apparaître. Il est représenté, au contact des deux terrains, par des couches marneuses de diverses couleurs très-peu consistantes, qui renferment des concrétions quartzeuses et qui, comme les bancs gypseux eux-mêmes, sont précisément les résidus de la dissolution des bancs de gypse inférieurs par les eaux superficielles.

Les faits que je viens de signaler permettent, je crois, de rendre compte, avec une grande probabilité, des apparences que présentent les masses gypseuses qu'on exploite à la base des collines, dans le département de la Haute-Saône.

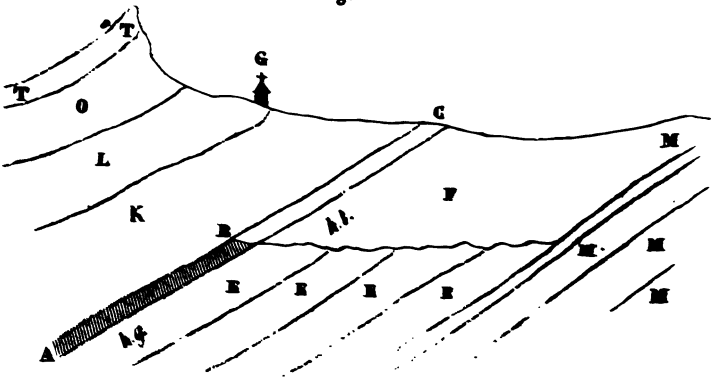
Les nombreux sondages qui ont traversé, dans la Haute-Saône, la partie inférieure de l'étage keupérien, ont montré qu'il existait entre la couche de houille et le muschelkalk une épaisseur d'au moins 100 mètres de gypses plus ou moins argileux et diversement colorés. Nous avons vu plus haut que dans la profondeur la couche de houille était en contact direct avec le gypse. Ce contact ne modifie en aucune façon les allures et l'inclinaison régulière de la couche de houille. On n'aperçoit ici aucun de ces faits de stratification tourmentée et irrégulière que les couches marneuses présentent dans le voisinage des amas de gypse, près de la surface du sol. Je n'hésite pas à penser que la dissolution superficielle des couches de gypse, dans tous les points où elles viennent affleurer à la base des collines keupériennes, a été une des causes déterminantes, peut-être même la cause unique, des apparences que présente leur gisement actuel. On peut expliquer, en effet, les contournements des couches marneuses qui entourent les amas par le peu de solidité de ces assises qui doivent venir se mouler sur le noyau gypseux à mesure que son volume diminue. Ces couches marneuses peuvent être elles-mêmes,

comme nous l'avons vu plus haut, les résidus de la dissolution des couches de gypse terreux diversement coloré qui se trouvaient dans le voisinage du sol. En un mot, il me paraît évident que les mêmes actions qui ont pu enlever le gypse par dissolution jusqu'à 30 ou 40 mètres de la surface du sol sur des plateaux peu ondulés, ont dû exercer une influence considérable sur les allures et le mode de gisements des mêmes couches, quand elles viennent affleurer à la base des collines, dans des points où elles n'ont pas été protégées par l'épaisseur des couches qui les recouvrent contre les eaux d'infiltration.

La coupe suivante (1), représentée *fig.* 3, permettra de concevoir les différences d'allure des dépôts gypseux suivant la disposition orographique du terrain dans lequel on les rencontre.

Coupe du sud au nord, passant par Gemonval.

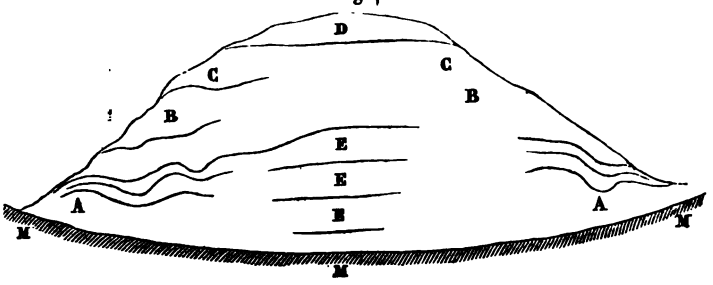
Fig. 3.



(1) *Légende de la* fig. 3. — A B C couche de houille; A B partie gypseuse; B C houille tendre; E E gypses marneux et salifères diversement colorés, dont l'épaisseur est d'au moins 100 mètres; F F terrain graveleux, mélangé de marnes diversement colorées, sans consistance, résidu de la dissolution des couches gypseuses par les eaux d'infiltration; L lias; T terrain jurassique; O oolithe inférieure représentée par les marnes; K terrain keupérien, marnes irisées dolomitiques; M M muschelkalk.

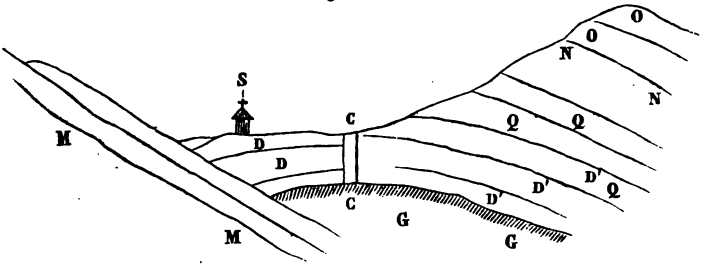
La coupe suivante en travers d'une butte gypseuse met en relief la même disposition (1).

Fig. 4.



La dissolution des amas de gypse a amené dans quelques localités des discordances de stratification très-prononcées entre le muschelkalk et les terrains supérieurs, par suite des affaissements du sol dont elle a été la cause. La coupe suivante (2), passant par le village de Saulnot du nord-ouest au sud-est, montre la dolomie en contact direct avec le muschelkalk.

Fig. 5.



(1) *Légende de la* fig. 4. — A amas gypseux, voisins de la surface du sol, entourés de couches marneuses diversement colorées, à stratification très-contournée; E E prolongement hypothétique des bancs gypseux sur la masse de la colline, en couches régulières; B C couches de l'étage keupérien, dolomie, marnes irisées; D couches de grès infraliasique qui couronnent la butte; M M muschelkalk.

(2) *Légende de la* fig. 5. — S village de Saulnot; M M couches du muschelkalk, inclinées d'environ 15 degrés; D D couches de dolomie keupérienne, qui coupent les couches du muschelkalk sous un angle de 60 degrés environ;

Gypses tertiaires du terrain de Paris. — Les considérations qui précèdent me paraissent entièrement applicables au terrain gypseux du bassin parisien.

On admet généralement que le dépôt gypseux du terrain tertiaire parisien a formé, dans l'origine, une masse lenticulaire dont le maximum d'épaisseur paraît correspondre à la butte Montmartre. Les buttes dans lesquelles on l'exploite présentent entre elles, quoique isolées les unes des autres, une très-grande ressemblance dans la nature des couches qui les constituent de la base au sommet. L'identité des lits marneux dans lesquels le gypse est enclavé, l'uniformité de composition et de structure de ces amas (1), ont permis de conclure qu'ils avaient présenté à l'origine une continuité parfaite, interrompue par des dénudations postérieures à l'émersion du terrain.

Je n'ai pas l'intention d'entrer ici dans de grands détails sur l'orographie des terrains gypseux parisiens. Je me contenterai de citer quelques faits qui prouvent, selon moi, l'influence des phénomènes de dissolution sur le mode de gisement actuel de ces masses.

Les dépôts gypseux qu'on exploite dans la vallée de la Marne présentent, d'après M. d'Archiac, le mode de gisement suivant : le gypse est exploité dans ces carrières par

---

C C puits pour exploiter le gypse ; D' D' couches keuperiennes en stratification concordant avec le terrain jurassique et le muschelkalk ; O O oolithe inférieure ; G gypse ; N N marnes et schistes ; Q Q Q calcaires à gryphées.

(1) Voici ce que dit à cet égard M. de Senarmont (*Description géologique de Sainte-Ode*, p. 5) :

« Quoique les amas de gypse n'aient par le caractère d'une formation régulière et continue, ils présentent cependant dans leur structure générale une assez grande uniformité de composition, et l'on peut distinguer » plusieurs couches, soit de gypse, soit de marne, qu'on retrouve à d'assez » grandes distances dans la même position relative. »

Cette correspondance entre la structure des amas gypseux, à de grandes distances, semble prouver qu'ils ne se sont pas formés par dépôts discontinus, et que la discontinuité a été la conséquence d'actions postérieures à leur dépôt.

des puits qui partent du sommet de la butte (1), atteignent le dépôt gypseux à 30 mètres environ de profondeur, et du pied desquels partent des galeries horizontales dirigées dans la masse gypseuse. Le gypse se présente dans chacune de ces collines en amandes très-aplaties (2), dont la plus grande épaisseur, qui est de 5 à 8 mètres, correspond au sommet de la butte, et qui vont en s'amincissant, en s'approchant du talus de la colline, pour disparaître avant de l'avoir atteint. Le même fait a été signalé par M. Alex. Brongniart (3) comme se présentant dans les carrières de pierre à plâtre des environs de Clamart. Cet amincissement progressif, qui coïncide avec la diminution d'épaisseur du terrain superposé, prouve, ce me semble, bien clairement, la dissolution des bancs gypseux par les eaux d'infiltration. Autrement, on ne comprendrait pas pourquoi le maximum d'épaisseur de ces amandes gypseuses se trouve précisément dans la verticale qui passe par le sommet de la butte, et pourquoi elles viennent se terminer précisément dans le voisinage des talus extérieurs. Cette disposition est, au contraire, une conséquence nécessaire des effets produits par l'action dissolvante des eaux d'infiltration.

J'ai préféré citer les exploitations gypseuses qui se font par travaux souterrains, sans altérer le relief extérieur du sol, plutôt que celles qui s'opèrent à ciel ouvert, comme à Montmartre par exemple. On ne trouve plus ici, par suite des travaux qui ont modifié tout le pourtour de la butte, que des masses gypseuses très-puissantes et très-régulières, parce qu'elles sont protégées par un chapeau épais de couches peu perméables. M. Alex. Brongniart cite pourtant les couches gypseuses mises à découvert dans la plaine de Pantin, comme présentant des inflexions nombreuses et considérables. Les tranchées profondes qui ont traversé dans ces

(1) D'Archiac, *Description géologique du département de l'Aisne.*
(2) D'Archiac, *Histoire des progrès de la géologie*, terrain tertiaire.
(3) Cuvier et A. Brongniart, *Description géologique des environs de Paris*

dernières années les marnes du travertin inférieur et du gypse, ont présenté en un grand nombre de points des inflexions nombreuses, évidemment postérieures au dépôt, et qu'on explique très-naturellement par des affaissements déterminés par la dissolution partielle ou totale des bancs gypseux.

Si maintenant nous raisonnons par analogie avec les circonstances que présente le gisement des gypses keupériens, nous pourrons déduire de ce qui précède quelques conséquences pratiques pour la recherche du gypse dans les environs de Paris. Nous avons vu que quand la superposition du keuper sur le muschelkalk s'opérait sur un plateau peu ondulé, rien n'annonçait la présence du gypse dont on trouvait cependant des épaisseurs considérables dans des sondages pratiqués à quelque distance des affleurements du muschelkalk. La non-apparition du gypse au jour, en beaucoup de points du bassin de Paris, est sans doute due à des causes analogues. Partout où les couches de gypse sont venues affleurer à la surface d'un talus très-peu incliné, elles ont dû disparaître jusqu'à une distance horizontale assez grande de leurs affleurements primitifs (1).

Résumé.

Les faits et les considérations renfermés dans la première partie de ce Mémoire peuvent se résumer comme il suit :

1°. Partout où les dépôts gypseux du terrain keupérien sont voisins de la surface du sol, ils ont été attaqués par l'action prolongée des eaux d'infiltration. Il en est résulté une dissolution partielle ou totale des amas gypseux, et la stratification des couches supérieures est devenue irrégulière et contournée à leur approche. Partout, au contraire,

(1) On a remarqué que l'état marneux des roches du travertin inférieur dénotait le voisinage du gypse. Il me paraît probable que les couches de marnes qui remplacent souvent le gypse dans le groupe sont, dans certains cas, les résidus de la dissolution des bancs gypseux, tout comme cela a lieu dans le terrain du keuper.

où les dépôts gypseux ont été préservés par des couches imperméables et par leur grande profondeur au-dessous du sol, ils se présentent en couches régulières, et la stratification des couches voisines n'en paraît nullement affectée.

2°. Les apparences que présente le gisement des gypses du bassin parisien, me paraissent s'expliquer aussi avec beaucoup de netteté quand on tient compte de l'action prolongée des eaux d'infiltration.

C'est en me servant de la couche de houille keupérienne comme d'un repère, que j'ai pu apprécier toute l'importance des effets géologiques produits par la dissolution progressive des couches de gypse.

Les considérations qui précèdent ne devront s'appliquer qu'avec réserve aux gisements gypseux qui paraissent avoir une origine métamorphique, ainsi qu'à ceux primitivement formés d'anhydrite et qui auraient éprouvé un gonflement par leur hydratation postérieure; on devra tenir compte néanmoins, dans l'application des circonstances de leur gisement, des effets possibles qui peuvent résulter de l'action prolongée des eaux d'infiltration.

DEUXIÈME PARTIE.

Altérations des terrains calcaires.

Les modifications qu'éprouvent les roches calcaires par l'action de l'atmosphère et des eaux d'infiltration sont de diverse nature et dépendent des corps qui se trouvent mélangés dans la roche avec le carbonate de chaux. Je n'ai point encore terminé l'étude que je compte faire de tous les changements que ces phénomènes apportent dans l'allure des couches et dans l'aspect pétrographique des roches qui les constituent. Je me contenterai donc d'indiquer aujourd'hui à l'Académie quelques-uns des faits dont je pense avoir trouvé l'explication.

La dissolution des couches calcaires par les eaux d'infiltration est un fait incontestable. Les eaux de pluie, en

s'enfoncant dans un sol qui contient des matières organiques en décomposition, s'y chargent d'acide carbonique et deviennent un dissolvant pour le calcaire qu'elles rencontrent. Le nitrate d'ammoniaque contenu dans les pluies d'orage doit aussi se décomposer au contact du calcaire, et produire du nitrate de chaux et du carbonate d'ammoniaque. Les apparences que présentent les couches calcaires au-dessous de la terre végétale montrent de la manière la plus évidente les effets de ces dissolutions successives. S'il s'agit d'un calcaire compacte et solide, comme le *cornsbrash* de l'oolite inférieure qui couronne des plateaux assez étendus dans le Doubs et dans la Haute-Saône, on voit le calcaire s'arrondir et se corroder sous la terre végétale, comme s'il avait été placé dans une dissolution acide faible. Les moules de corps organisés qu'il renferme et qui sont généralement à l'état spathique, résistent mieux que la pâte du calcaire à l'action du dissolvant et forment des saillies à la surface de la roche. On rencontre souvent des blocs calcaires percés de trous arrondis dans lesquels les racines des végétaux se sont insinuées. Enfin des cavités nombreuses et de dimensions souvent considérables, des grottes profondes, viennent témoigner de la grandeur et de l'importance du phénomène.

Quand les calcaires qui forment le sous-sol n'ont pas une grande solidité, l'action des eaux d'infiltration donne lieu à des apparences toutes différentes. Le calcaire grossier parisien en présente des exemples très-remarquables. Dans la plupart des carrières exploitées à ciel ouvert dans les environs de Paris, on remarque au-dessous de la terre végétale, et quelquefois jusqu'à 2 mètres et plus de profondeur, une succession de couches peu épaisses, les unes d'un calcaire désagrégé, les autres terreuses et qui présentent de très-grandes irrégularités dans leur stratification. Les couches de calcaire grossier placées au-dessous sont au contraire parfaitement horizontales. Le seul moyen de se rendre

compte d'une manière satisfaisante des irrégularités que présente l'allure des couches voisines de la surface, me paraît être de les attribuer à l'action dissolvante des eaux d'infiltration. Les puits naturels qui traversent quelquefois toute l'épaisseur du calcaire grossier et sur l'origine desquels beaucoup d'hypothèses ont été émises, me paraissent dus à des causes tout à fait analogues à celles qui ont produit les grottes creusées dans les calcaires solides du terrain jurassique et du terrain crétacé du midi de la France. La diversité des effets s'explique aisément, ce me semble, par les différences qui existent dans la nature et la solidité des roches. L'origine des altérations qu'ont éprouvées les couches du calcaire grossier voisines de la surface tient évidemment à des causes qui agissent encore aujourd'hui même à la surface du sol.

Les phénomènes de désagrégation et de dissolution des calcaires par les eaux d'infiltration se lient aussi à un fait d'un grand intérêt, la formation de la terre végétale. Il est à remarquer que les calcaires très-purs, comme les calcaires crayeux, ne sont recouverts que d'une très-faible épaisseur de terre végétale. Les couches calcaires très-mélangées d'argile et de sable laissent au contraire, par leur dissolution graduelle, un abondant résidu de matières meubles qui contribue à produire une couche épaisse de terre.

La dissolution de certaines couches calcaires par les eaux superficielles peut être démontrée, du reste, par un exemple analogue à celui qui m'a servi plus haut pour prouver que les terrains gypseux du keuper avaient été dissous jusqu'à une grande profondeur au-dessous du sol.

On exploite, comme on sait, dans le département de la Haute-Saône, des gîtes abondants de minerais en grains déposés dans le terrain tertiaire moyen. Les grains concrétionnés de minerai sont disséminés dans une argile dont on les sépare par le lavage. Le minerai lavé renferme souvent une forte proportion de petits fragments calcaires que les

ouvriers désignent sous le nom de *castillot*. On donne le nom de *mines grises* aux minerais chargés de calcaire, et par opposition celui de *mines rouges* à ceux qui n'en renferment pas. Les mines grises et les mines rouges sont exploitées dans les mêmes localités, mais les mines rouges se trouvent toujours très-près du sol, tandis que les mines grises s'exploitent à 10 et 12 mètres de profondeur. Il ne me paraît pas douteux que les mines rouges ne soient le produit de l'action prolongée des eaux d'infiltration sur les mines grises, et que les rapports d'origine qui existent entre les deux variétés de minerai ne soient tout à fait comparables à ceux que j'ai signalés plus haut entre les houilles tendres et les houilles gypseuses du trias (1).

Les faits qui précèdent se rapportent uniquement à la dissolution progressive des dépôts calcaires par les eaux d'infiltration. Il est d'autres matières qui modifient l'aspect pétrographique de la roche sans la détruire. Je me contente aujourd'hui d'en citer deux exemples.

Calcaires avec pyrites de fer. — 1°. La formation jurassique renferme, comme on sait, une grande quantité de pyrites de fer. On les a remarquées surtout dans les formations marneuses qui constituent la base des étages, mais on les rencontre aussi en abondance dans les calcaires. Elles y forment des nids plus ou moins volumineux, plus ou moins abondants. Si la proportion de pyrite est considérable, le calcaire se désagrége et se détruit progressivement à mesure que la pyrite se décompose par l'action de l'oxygène atmosphérique et des eaux superficielles. Il résulte en définitive de la décomposition, du sulfate de chaux qui est entraîné par l'eau et du peroxyde de fer terreux qui reste dans le

(1) J'ai analysé séparément les mines grises et les mines rouges de Montureux (Haute-Saône). La mine grise renferme 26 pour 100 de calcaire, les mines rouges n'en renferment pas. La composition des grains de minerai est la même dans les deux cas (t. Ier, p. 294.) Voir aussi un Mémoire de M. Thirria (*Annales des Mines*, 4e série, t. XIX).

résidu de la désagrégation. La décomposition de la pyrite s'arrête, du reste, à une petite distance de la surface du sol.

Le mode d'altération que je signale, peut s'observer de la manière la plus évidente dans les couches subordonnées à l'Oxford-Clay, près de Beaume-les-Dames, couches qui représentent les minerais de fer oolitiques du Châtillonnais. L'ouverture d'un chemin a mis à découvert, il y a quelques années, des couches épaisses de plusieurs mètres, constituées par un calcaire pétri de noyaux pyriteux. On peut observer déjà les modifications profondes survenues dans la texture de la roche depuis l'époque très-peu éloignée où elle a été mise à découvert.

Si la proportion des noyaux pyriteux n'est pas très-considérable, il peut arriver que le calcaire ne se désagrége pas à la suite de la décomposition de la pyrite. Les mêmes couches qui se présentent dans la profondeur comme formées par un calcaire compacte avec noyaux pyriteux se montrent près du jour criblées de trous, remplis en tout ou en partie d'hydroxyde de fer terreux. La pyrite de fer en se décomposant a entraîné une proportion considérable de calcaire dont le volume est environ trois fois plus grand que celui de la pyrite (1). J'ai observé ce fait dans des calcaires qu'on trouve, vers la base de l'étage oolitique inférieur, à Beaume-les-Dames, à peu près au niveau géologique de la terre à foulon. Des couches de calcaire qui présentaient à la surface des vides nombreux partiellement remplis d'hydroxyde de fer, ayant été coupées à quelques mètres de distance de leurs affleurements pour l'établissement d'un chemin, sur le revers nord de la montagne de Chataud, ont

(1) Un équivalent de pyrite de fer $FeS^2 = 750$ donne 2 équivalents d'acide sulfurique, qui dissoudront 2 équivalents de calcaire $2\,CO^2\,CaO = 1250$. La densité de la pyrite étant à celle du calcaire dans le rapport de $\frac{4,7}{2,7} = 1,75$, la pyrite doit produire dans le calcaire un vide équivalent à 2,91 fois son volume.

présenté des nodules pyriteux disséminés dans un calcaire très-compacte.

2°. Le dernier fait qu'il me reste à citer, peut s'observer dans une foule de localités très-éloignées les unes des autres et dans un grand nombre de couches du terrain jurassique.

Les couches calcaires jurassiques présentent très-souvent une teinte bleue très-prononcée, mais qui est loin d'être uniforme dans la même couche. La même pierre présente souvent une partie bleue très-nettement circonscrite sur un fond jaunâtre. Ce fait, qui se remarque sur la plupart des pierres de taille qui ont servi à la construction des maisons à Besançon, à Dijon et dans un grand nombre d'autres villes, a été noté comme donnant à la physionomie de ces villes un caractère particulier. Quand on examine ces roches, soit dans les carrières des départements de la Franche-Comté, soit dans les nombreuses tranchées qui ont été ouvertes dans les calcaires de l'oolite inférieur, aux environs de Dijon, pour l'établissement du chemin de fer, on reste convaincu que la partie jaunâtre de la roche était primitivement bleue, et que cette teinte a disparu par des réactions postérieures. On observe, en effet, que les parties bleues se trouvent toujours dans l'intérieur des couches à distance des plans de stratification et des fissures qui traversent la roche et qui peuvent donner accès aux eaux d'infiltration. Les parties bleues forment ordinairement des amandes discontinues ; quelquefois la partie moyenne du banc est entièrement bleue, tandis que les deux faces supérieure et inférieure sont d'un blanc jaunâtre. Toutes ces apparences me paraissent complétement d'accord avec l'hypothèse d'après laquelle on admettrait une teinte bleue primitive dans toute la roche et sa disparition successive et graduelle par l'effet des eaux d'infiltration.

Les essais chimiques que j'ai faits sur la partie bleue et la partie jaunâtre d'un même échantillon de calcaire extrait d'une carrière de Beaume-les-Dames, ouverte dans le pre-

mier étage jurassique (cornbrash), m'ont conduit à ce résultat inattendu que la couleur bleue de la roche était due à la présence de $\frac{2}{1000}$ de bisulfure de fer disséminés uniformément dans toute la masse. On peut isoler la matière colorante du calcaire, en traitant celui-ci par l'acide chlorhydrique étendu qui en sépare une matière noire floconneuse et très-légère. C'est un mélange d'argile avec 10 pour 100 de bisulfure de fer dans un état de division extrême. Dans cet état, il ne s'attaque pas par l'acide chlorhydrique même concentré et chaud, et il ne se dissout que dans l'eau régale ou l'acide nitrique. La calcination en vases clos en sépare du soufre, et ce résidu s'attaque avec facilité par l'acide chlorhydrique avec dégagement d'hydrogène sulfuré (1).

On ne peut s'empêcher de comparer ce phénomène de teinture du calcaire par le bisulfure de fer, à celui que présentent certains métaux, tels que l'or et l'argent qui peuvent colorer les verres en rouge ou en jaune, même quand ils sont en proportion extrêmement minime. A cet état de division ils n'ont plus l'éclat métallique, même après avoir été isolés du corps dans lequel ils étaient disséminés. La coloration des calcaires par le bisulfure de fer, dans un état isomérique particulier, paraît être un phénomène de même ordre.

Il y a lieu de penser que la coloration bleue si fréquente des marnes et des argiles est due aussi à la présence du bisulfure de fer. La teinte qu'elle présente est sensiblement la même que celle des calcaires. Elle disparaît aussi par le contact prolongé avec l'air, pour faire place à une coloration jaunâtre ou rougeâtre. Les couches d'argile plastique du

(1) Cet état particulier du bisulfure de fer est analogue à celui sous lequel il a été obtenu par M. de Senarmont, en décomposant dans un tube fermé un sel de fer par un bisulfure alcalin à la température de 170 degrés. Ainsi préparé, le bisulfure de fer était en poudre noire sans éclat métallique, inaltérable à l'air, et inattaquable par les acides non oxydants.

bassin de Paris sont souvent bariolées de rouge, de jaune et de bleu, dans les parties voisines de la surface.

Cette dissémination du sulfure de fer dans une étendue si considérable des terrains stratifiés est un fait remarquable à un autre point de vue. J'ai établi, en effet, dans un précédent travail, que la formation de la pyrite de fer, dans les terrains stratifiés (p. 50), était une des principales réactions qui restituaient à l'atmosphère de l'oxygène emprunté aux éléments minéraux de la croûte solide du globe. On voit que ce phénomène s'est produit pendant toute la durée d'un grand nombre de périodes géologiques, avec une continuité qu'on était loin de soupçonner. Tout porte à croire qu'il se produit encore aujourd'hui, et qu'il joue un rôle considérable parmi les causes qui tendent à amener des modifications dans la composition de l'atmosphère terrestre. L'étude des grandes lois qui maintiennent ou qui feront varier dans l'avenir la composition de notre atmosphère est assurément un sujet des plus dignes d'attention; et si l'on parvient à trouver dans les formations géologiques, comme dans les phénomènes qui se passent encore sous nos yeux, des traces de ces importantes réactions, on pourra rendre ainsi à la science un service des plus signalés.

QUATRIÈME PARTIE.

RECHERCHES DE MÉTALLURGIE.

PREMIÈRE DIVISION.

CARBONISATION DU BOIS ET DE LA HOUILLE.

I.

Notice sur quelques expériences faites sur la distillation du bois.

Tous les essais exécutés au laboratoire de Vesoul ont été faits à une température fixe, celle de l'ébullition du mercure (360 degrés). Ce métal était placé dans une large capsule en porcelaine. Les matières à essayer étaient introduites, soit dans une fiole à médecine, soit dans une capsule plus petite que l'on recouvrait avec un entonnoir en verre. La grande capsule et les appareils placés sur le mercure étaient recouverts par un large entonnoir qui servait à condenser la vapeur mercurielle.

Plusieurs rondelles de chêne (1), du poids de 4gr,50 à 6 grammes, ont été chauffées successivement sur le mercure bouillant pendant une heure et demie : elles ont toutes donné entre 31 et 33 pour 100 d'un charbon dont la couleur était le noir intense, sans le reflet métalloïde qui caractérise le charbon fortement calciné. Au creuset de platine, ces charbons ont perdu, par une calcination à la cha-

(1) Les rondelles proviennent du bois indiqué sous le n° 4, dans les expériences citées plus loin sur la carbonisation rapide du bois vert.

leur blanche, 0,28 à 0,30 de leur poids de matières volatiles, ce qui porte la proportion de charbon qu'elles laissent, rapportée au poids du bois vert, à $31 \times 0,72 = 22,3$ ou à $33 \times 0,70 = 23,1$ de charbon.

Le goudron qui se dégage dans ces expériences ruisselle le long de l'entonnoir jusque près du mercure bouillant, où il se distille de nouveau en laissant un résidu de charbon boursouflé et très-brillant.

J'ai chauffé dans une fiole 5 grammes de fer oxydé hydraté presque pur avec $1^{gr},50$ de sciure de chêne. Le mercure est resté en ébullition pendant plus d'une heure. La poussière du minerai de fer était devenue rouge, mais elle n'était nullement attirable au barreau aimanté. A 360 degrés, l'hydroxyde de fer perd donc son eau, mais il n'est pas encore réductible par les produits de la distillation du bois.

L'action de la chaux éteinte sur le bois pendant sa distillation offre des circonstances assez remarquables.

Dix grammes de sciure de chêne ont été mêlés avec 10 grammes de chaux vive qu'on a réduite en bouillie pour la mêler avec le bois. Le mélange, placé dans une fiole à médecine, a été chauffé sur le mercure bouillant pendant une heure et demie. Il ne s'est presque pas formé de goudron, et les vapeurs, qui exhalaient une odeur un peu éthérée, analogue à celle de l'acide pyro-acétique, ne rougissaient pas le tournesol; le résidu a été repris par l'eau, qui s'est colorée en jaune. J'ai filtré, puis séparé l'excès de chaux par un courant d'acide carbonique. Ensuite, la liqueur filtrée a été évaporée à siccité, et elle a donné $1^{gr},35$ de sels bruns bien desséchés. Une partie de ces sels a laissé 0,37 de chaux par grillage et calcination, ce qui correspond à la composition de l'acétate de chaux anhydre. Une autre partie des mêmes sels, distillée à une température ménagée avec de l'acide sulfurique concentré, a donné un liquide incolore fortement acide, qui possédait une odeur d'acide acétique

très-prononcée. Je l'ai saturée avec de l'eau de baryte, qui a donné un précipité de sulfate de baryte. La liqueur filtrée, traitée par l'acide carbonique et filtrée de nouveau, puis évaporée jusqu'à siccité, m'a donné un sel cristallisé en petites aiguilles, dont la dissolution précipitait abondamment le nitrate d'argent et le protonitrate de mercure. Tous ces caractères prouvent bien que l'acide combiné à la chaux est de l'acide acétique.

Si le résidu salin se compose uniquement d'acétate de chaux, ainsi que cela paraît probable, on voit qu'on peut obtenir, avec la sciure de chêne et la chaux éteinte, 12 pour 100 au moins du poids du bois d'acétate de chaux, lequel correspond à 7,50 pour 100 d'acide acétique anhydre. On pourrait peut-être utiliser ce résultat pour fabriquer l'acide acétique. On se servirait de menus débris de matières ligneuses, comme de la sciure de bois, de la paille hachée, des débris de vannage de blé, etc., avec de la chaux en bouillie, et l'on en formerait des briquettes que l'on chaufferait à la température la plus convenable, etc.

Lorsqu'on mêle 5 grammes de sciure avec 2gr,50 de chaux, l'absorption des vapeurs acides produites par la distillation n'est pas tout à fait aussi complète; il se dégage un peu de goudron.

Je n'ai pas examiné le résidu de la lixiviation de la sciure traitée par la chaux; il y a là des recherches fort intéressantes à faire. Ce résidu est extrêmement combustible. Il s'embrase sans produire de flamme, et il laisse du carbonate de chaux tout à fait blanc. Si la chaux produisait le même effet sur les menues houilles que sur le bois, il serait facile d'obtenir des fours à réverbère complétement fumivores.

J'avais pensé d'abord qu'il y aurait avantage à substituer, dans le haut fourneau, la chaux vive au calcaire employé comme castine. On a vu que celui-ci absorbait, dans la partie supérieure du fourneau, une quantité notable

d'acide acétique. La chaux vive placée dans les mêmes circonstances se déliterait sous l'action de la vapeur d'eau et l'absorberait en même temps que l'acide acétique et le goudron. L'acétate de chaux formé ne se décomposant qu'au rouge naissant, en dégageant de l'esprit pyro-acétique, les propriétés fortement réductives de celui-ci pourraient être utilisées. Le grand état de division de la chaux, après son extinction dans le fourneau, serait peut-être un obstacle à la réussite de ce procédé.

En employant la chaux vive au lieu de castine dans les fourneaux au charbon de bois, on éviterait une cause assez active de refroidissement du courant d'air. On sait, en effet, d'après les expériences de M. Bischoff (*Annales des Mines*, tome IX, page 301), qu'en décomposant le carbonate de chaux par la chaleur, à une température évaluée à 1,200 degrés au moins, le gaz qui se dégage n'a qu'une température de 25 degrés; la quantité de chaleur rendue latente est donc très-considérable.

II.

Recherches sur la carbonisation du bois.

Toutes les méthodes au moyen desquelles on opère la transformation du bois en charbon peuvent se diviser en deux classes. Dans l'une, le bois reçoit la chaleur nécessaire à sa distillation par l'intermédiaire d'un corps solide qui le renferme, en sorte que le charbon n'est en contact qu'avec les produits de la distillation : c'est la carbonisation en vases clos. Dans la deuxième classe, se rangent tous les procédés dans lesquels on introduit, au milieu de la masse du bois à carboniser, une quantité d'air limitée, de manière à brûler une partie du combustible pour distiller l'autre : la

carbonisation s'opère ici sans l'intermédiaire d'un vase, et la chaleur se transmet directement du courant de gaz échauffé au combustible.

La carbonisation en vases clos est évidemment la méthode la plus simple et celle qui doit donner la plus forte proportion de charbon, lorsqu'elle sera convenablement conduite. Les résultats en sont en tout comparables à ceux obtenus dans de nombreuses expériences de laboratoire.

La théorie de la carbonisation, dans les diverses méthodes par combustion incomplète, présente, au contraire, un grand nombre de points indécis. Ainsi, par exemple, on ne sait pas si l'air se brûle par les produits de la distillation du bois ou par le charbon, si son oxygène passe dans cette combustion à l'état d'acide carbonique ou à l'état d'oxyde de carbone. On n'a pas non plus de notions positives sur la distribution de l'air dans l'intérieur de la meule, sur la manière dont la carbonisation s'y propage. La solution de ces différentes questions est cependant indispensable pour pouvoir apprécier, en connaissance de cause, la valeur des nombreuses modifications proposées au procédé de la carbonisation en meules dans le but d'obtenir, soit un plus fort rendement en charbon, soit un combustible analogue au charbon roux.

J'ai pensé que l'analyse des gaz qui se dégagent des évents pratiqués à la surface de la meule permettrait d'éclaircir quelques-uns des points dont je viens de donner l'indication. J'ai exécuté les expériences qui font le sujet de ce Mémoire à l'usine d'Audincourt, où l'on fabrique sur place une quantité considérable de charbon au moyen du bois flotté sur le Doubs.

Le procédé ordinaire de la carbonisation en meules à subi à Audincourt quelques modifications qui sont maintenant d'un usage régulier et qui ont augmenté très-notablement le rendement en charbon. Voici en quoi elles consistent. On sait que les meules à charbon sont établies

ordinairement sur une aire plane, et qu'on ménage au centre et sur toute la hauteur de la meule une cheminée dans laquelle on verse du charbon allumé, puis du bois menu afin de mettre la meule en feu. Des évents pour faire entrer l'air sont déjà ménagés à la base et sur tout le pourtour de la meule. La cheminée reste ouverte pendant un certain temps, afin que tout le centre du tas puisse entrer en ignition. Cette combustion produit un vide que le charbonnier doit avoir grand soin de combler en faisant tomber le charbon déjà formé au moyen d'une longue perche et en remplissant constamment la cheminée avec du bois. Il est très-important de commencer par produire au centre de la meule un amas de charbon. Quand la combustion est suffisamment active à l'intérieur, on bouche la cheminée, puis, après quelque temps, on commence à percer dans la couverture, à partir du sommet, des évents qui donnent issue aux produits de la carbonisation. La couleur et l'abondance de la fumée qui s'en dégage permettent de juger de l'avancement de l'opération dans cette partie de la meule. Quand cette fumée est d'un bleu clair, presque transparente et fort peu abondante, l'ouvrier sait que la carbonisation est achevée dans cette zone, et il perce de nouveaux évents dans un plan horizontal à $0^m,20$ ou $0^m,30$ au-dessous du niveau des précédents qui se ferment spontanément. On continue ainsi jusqu'à ce que les évents *de dégagement* soient arrivés près des évents *d'admission* de l'air. Ceux-ci restent ouverts à la base de la meule pendant toute la durée de la carbonisation.

Les modifications pratiquées à Audincourt diffèrent peu de celles indiquées par plusieurs auteurs et notamment par M. Karsten (*Traité de la métallurgie du fer*, t. I, p. 395). Elles consistent à supprimer le vide de la cheminée et à déterminer l'inflammation du cœur de la meule au moyen d'une plaque de tôle chauffée par-dessous. On pratique au centre de l'aire un vide conique qui a $1^m,33$ de diamètre à

sa base supérieure, $0^m,50$ à sa partie inférieure et $0^m,50$ de hauteur. Les parois en sont formées par des briques. Trois conduits en briques de $0^m,12$ de côté partent du fond de cette chaudière et viennent déboucher à l'air libre, en dehors de l'espace réservé pour la meule. La chaudière est remplie de menu bois, de fumerons et recouverte d'une plaque de tôle. On dresse la meule sur une base de 9 mètres de diamètre, avec du bois scié en bouts de $0^m,67$ de longueur et sur trois étages. Dans toute la partie qui correspond à la projection de la chaudière, on met sur le premier étage de bois une couche épaisse de terre et de fraisil, puis on dispose la meule comme à l'ordinaire, en ayant soin que les vides laissés entre les bûches soient le plus petits possible et que chaque bûche se trouve toujours dans un plan diamétral passant par l'axe de la meule. On met le feu au combustible contenu dans la chaudière. On découvre la partie supérieure de la meule et on ouvre les trous du pied. Le fraisil placé sur le premier étage sert à élargir l'espace dans lequel la combustion commence, pour se répandre ensuite dans toute la masse du bois. Quand la meule est bien en feu, on ferme les trois ouvreaux communiquant avec la chaudière, on couvre la meule et on conduit l'opération comme à l'ordinaire en perçant les évents à partir du haut. L'opération dure 4 à 5 jours et s'exécute sur 28 à 35 stères de bois. On a reconnu qu'il y a avantage à opérer sur ce volume de bois, au lieu de 150 à 180 stères qui composaient les anciennes meules d'Audincourt et dont la carbonisation durait 12 à 15 jours. Le bois était scié en bouts de $1^m,33$ de longueur.

Voici les résultats obtenus à Audincourt dans la carbonisation faite par trois procédés différents du 1er juillet au 20 octobre 1841. Le bois peut être considéré comme composé de 0,75 d'essences dures et 0,25 d'essences tendres.

1°. Ancienne méthode. Meules de 150 à 180 stères. Bois de $1^m,33$ de longueur.

2°. Même méthode. Aire plane. Meules de 28 à 35 stères. Bois scié en bouts de $0^m,67$ de longueur.

3°. Meules de 28 à 35 stères. Bois scié de $0^m,67$ de longueur; emploi de la chaudière en briques.

INDICATION des procédés.	NOMBRE de stères de chaque meule.	NOMBRE de meules.	STÈRES de bois consommés.	PRODUITS. Charbon.	PRODUITS. Braise.	MISE au 100 hect. de charbon et braise. — Bois.	PRODUIT par 100 de bois en volume.
				hectolitres	h.	stères.	
1°. Ancienne méthode.	150 à 180	39	6.686 $\frac{3}{4}$	23.856	570	27,38	36,52
2°. Places simples.	28 à 35	20	669	2.555	90	25,29	39,55
3°. Places à courants.	28 à 35	41	1.303	5.508	190	22,86	43,73

Il y a, comme on le voit, un avantage considérable à employer les modifications que je viens d'indiquer dans le travail de la carbonisation, et en 1842 on n'a plus carbonisé sur le port d'Audincourt que par le procédé des places à *chaudière*, mais on a reconnu qu'on pouvait sans inconvénient porter à 50 ou 60 stères le volume du bois à carboniser dans une opération.

L'avantage des petites meules sur les grandes consiste, toutes choses égales d'ailleurs, surtout dans la plus grande facilité qu'a l'ouvrier de surveiller et de conduire son fourneau. L'emploi des places à chaudière au lieu des places simples permet d'éviter le remplissage qui doit avoir lieu à plusieurs reprises par la cheminée de la meule, pendant la première partie de l'opération. Néanmoins il est douteux que le procédé des places à chaudière puisse être suivi en

forêt, où le lieu de la carbonisation se déplace continuellement, et où, par conséquent, l'établissement d'une chaudière en briques et des conduits souterrains qui y aboutissent serait un embarras pour le charbonnier. Il paraît, en outre, que dans les terres très-humides, comme celles où l'argile prédomine, il est difficile d'allumer convenablement la meule au moyen du feu qu'on fait dans la chaudière.

Carbonisation en meules.

Les expériences qui suivent ont toutes été faites sur des meules à chaudière; mais comme la conduite du feu est la même dans toutes les méthodes, une fois que la carbonisation proprement dite commence, les conclusions que j'en tirerai pourront être généralisées et appliquées à toutes les méthodes de carbonisation en meules.

Les gaz ont été aspirés dans un flacon rempli d'eau et d'huile et analysés d'après les procédés qui seront décrits plus loin. Nous nous bornerons à dire ici que, dans toutes ces expériences, la détermination des gaz, à l'exception de l'azote, a été faite par des pesées. Après l'absorption de la vapeur d'eau et de l'acide carbonique par le chlorure de calcium et la potasse, les gaz étaient brûlés par leur passage à travers un tube rempli d'oxyde de cuivre; l'eau et l'acide carbonique résultant de cette combustion étaient condensés par le chlorure de calcium et la potasse.

La proportion des produits condensables a été déterminée à part dans des expériences spéciales.

J'ai analysé les gaz qui s'échappent des évents de dégagement lorsque la fumée est abondante et épaisse, ce qui arrive pendant les premières heures à partir de l'ouverture des évents, et vers le moment où ils se ferment naturellement, quand la fumée est claire, bleuâtre et peu abondante.

J'ai obtenu les résultats suivants dans neuf expériences faites sur plusieurs meules différentes.

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
Gaz pour l'analyse..	cc. 1.535	cc. 2.560	cc. 1.565	cc. 1.600	cc. 1.590	cc. 1.584	cc 1.575	cc. 1.537	cc. 1.565
Baromètre.....	m. 0,732	m. 0,717	m. 0,725	m. 0,725	m. 0,722	m. 0,718	m. 0,727	m. 0,725	m. 0,720
Thermomètre....	16°	18°	14°	9°	14°	14°,5	12°	18°,5	16°
Gaz ramené à 0° et à $0^m,760$..	cc. 1.396,5	cc. 1.381	cc. 1.415,6	cc. 1.506	cc. 1.423	cc. 1.438	cc, 1.443,3	cc. 1.373	cc. 1.496,4
Acide carbonique.....	gr. 0,707	gr. 0,730	gr. 0,763	gr. 0,772	gr. 0,807	gr. 0,599	gr. 0,672	gr. 0,633	gr. 0,636
Produits de la combustion. Eau.....	0,103	0,119	0,133	0,113	0,103	0,110	0,057	0,150	0,159
Produits de la combustion. Acide carbonique.	0,240	0,258	0,215	0,278	0,432	0,146	0,143	0,160	0,167
Produits de la combustion. Oxygène absorbé..	0,184	0,181	0,199	»	0,244	0,137	0,096	0,186	0,198
Dosage direct d'azote.....	58,7	53,8	54,0	54,2	49,4	62,9	65,9	58,8	56,2

(1) Gaz aspiré dans un évent pratiqué au tiers de la hauteur de la meule, deux jours après la mise en feu. La meule

est de 60 stères. L'évent est ouvert depuis six heures et donne une fumée blanche, épaisse et assez abondante. Il se dépose beaucoup d'eau et de goudron dans les tubes d'aspiration. Un thermomètre à mercure enfoncé de $0^m,10$ dans le trou et retiré après 8 minutes marque 260 degrés.

(2) Gaz pris sur la même meule, 24 heures après le précédent. Évent ouvert depuis une heure seulement. Fumée blanche très-épaisse et très-abondante.

(3) Gaz aspiré 24 heures après le précédent et sur la même meule, dans un évent ouvert à $0^m,60$ du sol depuis une heure seulement. Fumée blanche très-épaisse. Température essayée au thermomètre à mercure : 230 degrés.

(4) Pris à $0^m,60$ du sol sur un fourneau de 35 stères, quatre jours après la mise en feu. Il sort par cet évent une fumée blanche très-abondante et très-épaisse.

(5) Gaz aspiré à $0^m,30$ de distance du sol, 18 heures avant la fin de la cuisson et dans la même meule que (4). Fumée blanche et épaisse.

(6) Gaz aspiré dans un évent ne produisant plus qu'une fumée peu abondante, bleuâtre et transparente, à $0^m,60$ du sol, 36 heures avant la fin de la cuisson. Cette expérience a été faite sur une autre meule que les deux précédentes.

Les trois expériences 4, 5, 6, ont été faites en 1841.

(7) Gaz aspiré dans la même meule que (1), 18 heures après. Les évents sont percés à $0^m,30$ au-dessous de ceux correspondants au gaz (1). Il sort par le trou une fumée blanche peu épaisse. Il est ouvert depuis quatre heures au moment où l'aspiration a eu lieu.

(8) Gaz aspiré cinq heures après le précédent et dans le même évent. La fumée est claire et très-peu abondante. Un thermomètre plongé à $0^m,10$ de profondeur a marqué après 10 minutes 250 degrés.

(9) Gaz aspiré sur la même meule que le précédent, 24 heures après, et dans un évent qui ne produisait plus

qu'une fumée très-peu abondante, bleuâtre et presque transparente.

J'ai donné, p. 232, la description exacte de l'appareil dont je me suis servi. La figure qui l'accompagne est rendue plus intelligible encore par l'exposé des précautions à prendre pour assurer l'exactitude des résultats obtenus. Il m'a donc paru complétement inutile de reporter dans ce Mémoire ces précautions que l'expérience m'avait suggérées, j'ai pensé que leur description serait mieux placée dans le travail mentionné.

Les analyses consignées au tableau de la page 110 ont conduit aux résultats suivants.

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Acide carbonique....	25,57	26,68	27,23	25,89	28,34
Oxyde de carbone..	8,68	9,25	7,67	9,33	15,17
Hydrogène.....	9,13	10,67	11,64	9,28	8,87
Azote.....	56,62	53,40	53,46	55 50	47,62
TOTAUX.....	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

	(6)	(7)	(8)	(9)
Acide carbonique....	21,26	23,51	23,28	23,08
Oxyde de carbone...	5,18	5,00	5,88	6,04
Hydrogène.....	8,84	4,89	13,53	14,11
Azote	64,72	66,60	57,31	55,77
TOTAUX.....	100,00	100,00	100,00	100,00

La proportion des produits liquides contenus dans les fumées a été déterminée d'une manière peu différente de celle

qu'on trouvera décrite plus loin. On faisait plonger dans l'évent un bout de tube étroit, long de $0^m,10$, qui communiquait avec un tube à chlorure de calcium, long de $0^m,25$. Celui-ci était mis en communication par un tuyau en plomb avec un flacon aspirateur à couche d'huile. Le volume de l'eau écoulée permet de calculer celui du gaz correspondant à l'augmentation de poids du tube à chlorure de calcium.

J'ai obtenu dans trois expériences :

	(1).	(2).	(3).
Eau écoulée.....	$1^{lit},120$	$1^{lit},080$	$1^{lit},640$
Différence de niveau.....	$0^m,25$	$0^m,42$	$0^m,48$
Baromètre.....	$0^m,732$	$0^m,732$	$0^m,730$
Thermomètre.....	12°	13°	14°
Gaz ramené à l'état sec, à 0 degré et à $0^m,760$....	$0^{lit},992$	$0^{lit},936$	$1^{lit},400$
Augmentation du poids du tube à chlorure.....	$0^{gr},979$	$1^{gr},000$	$0^{gr},743$

ce qui conduit aux nombres suivants :

	(1).	(2).	(3).
Produits liquides, sur 1 litre de gaz sec, à 0 degré et à $0^m,760$.....	$0^{gr},987$	$1^{gr},068$	$0^{gr},531$

(1). Évent à 1 mètre du sol, ouvert depuis une heure. Fumée blanche épaisse.

(2). Gaz pris 45 minutes après le précédent dans un évent placé au même niveau. Fumée blanche, très-abondante.

(3). Gaz aspiré dans un évent à 1 mètre du sol, ne donnant plus qu'une fumée bleuâtre et presque transparente. La cuisson est fort avancée dans cette partie de la meule.

Pour tirer des résultats qui précèdent quelques conclusions relatives à la théorie de l'opération, je ferai remar-

quer d'abord que la proportion d'acide carbonique est toujours beaucoup plus considérable que celle de l'oxyde de carbone, et que l'oxygène contenu dans le dernier gaz ne représenterait guère en moyenne que les 0,25 de celui correspondant à l'azote. Il est donc évident déjà que la majeure partie de l'oxygène contenu dans l'air introduit dans la meule passe seulement à l'état d'acide carbonique. Mais il est facile de prouver, par d'autres considérations, que la totalité de l'oxygène de l'air est transformée en acide carbonique sans mélange d'oxyde de carbone.

Si nous reprenons, en effet, les résultats des analyses, et si nous supposons que tout l'oxygène correspondant à l'azote s'y trouve à l'état d'acide carbonique, nous trouverons en retranchant l'azote et l'acide carbonique correspondant dans chaque analyse, les nombres suivants :

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Acide carbonique.....	10,70	12,66	13,06	11,32	15,84
Oxyde de carbone.....	8,68	9,25	7,67	9,33	15,17
Hydrogène.....	9,13	10,67	11,64	9,28	8,87
TOTAUX.....	28,51	32,58	32,37	29,93	39,88

	(6)	(7)	(8)	(9)
Acide carbonique.....	4,32	6,02	8,23	8,46
Oxyde de carbone.....	5,18	5,00	5,88	6,04
Hydrogène.....	8,84	4,89	13,53	14,11
TOTAUX.....	18,34	15,91	27,64	28,61

Ou sur 100 parties :

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Acide carbonique.....	37,5	38,8	40,3	37,8	39,7
Oxyde de carbone.....	30,4	28,4	23,6	31,2	38,0
Hydrogène.....	32,1	32,8	36,1	31,0	22,3
TOTAUX.....	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

	(6)	(7)	(8)	(9)
Acide carbonique.....	23,5	37,8	29,8	29,6
Oxyde de carbone.....	28,2	31,4	21,2	21,1
Hydrogène.....	48,3	30,2	49,0	49,3
TOTAUX.....	100,0	100,0	100,0	100,0

Carbonisation en vases clos.

J'ai comparé ces résultats à ceux que donne l'analyse des gaz produits par la carbonisation en vases clos. On a placé dans un cylindre en fonte de $0^m,22$ de diamètre intérieur sur $1^m,50$ de longueur, 10 kilogr. de bois de rondin scié en bouts de $0^m,15$ de longueur. Une des bases du cylindre était fermée; l'autre était recouverte d'une plaque de fer munie d'un trou pour laisser sortir les produits de la carbonisation. Le cylindre ainsi préparé a été introduit dans un des fours de la tôlerie d'Audincourt où la température peut s'élever au rouge-cerise. Il s'est dégagé d'abord beaucoup de vapeur d'eau, puis une fumée épaisse et piquante, et le gaz a fini par s'allumer à l'ouverture ménagée dans la base du cylindre en donnant une flamme bleuâtre. Après une heure et demie, on a retiré le cylindre du four. On a

trouvé 2^{kil},5 pour le poids du charbon, en sorte que le bois a rendu 25 pour 100 de son poids. Ce charbon était en petits fragments, friable et d'une facile combustibilité. Essayé par calcination, il a perdu 9,4 pour 100 de son poids.

La composition des gaz produits a été déterminée de la même manière que dans la carbonisation en meules. Le gaz était aspiré au moyen d'un tube plongeant de 1 décimètre dans le cylindre. Deux expériences ont donné :

		(10).	(11).
Gaz pour l'analyse		1.440^{cc}	1.176^{cc}
Baromètre		0^{m},736	0^{m},735
Thermomètre		15°,5	14°
Gaz ramené à 0 degré et à 0^{m},760		1.317^{cc}	1.080^{cc}
Acide carbonique		1^{gr},171	0^{gr},625
Produits de la combustion.	Eau	0^{gr},179	0^{gr},386
	Acide carbonique	0^{gr},960	0^{gr},533
	Oxygène	0^{gr},527	0^{gr},556

(10) Le gaz est aspiré une demi-heure après l'introduction du cylindre dans le four. Il sort par l'orifice une fumée blanche, épaisse, irritante et non inflammable. Une grande quantité d'eau et de goudron se condense dans les tubes d'aspiration.

(11) Gaz aspiré 1^{h} 20^{m} après le commencement de la carbonisation. Le gaz sortant du cylindre brûle spontanément à l'air avec une flamme bleue, mais il est encore opaque et blanc dans le flacon aspirateur, par suite de la présence d'une certaine quantité de vapeurs huileuses.

Les résultats de ces expériences confirment la composition suivante.

	(10).	(11).
Acide carbonique	44,9	29,2
Oxyde de carbone	36,8	24,9
Hydrogène	16,8	44,2
Azote et perte	1,5	1,7
	100,0	100,0

Dans l'expérience (10), il y a un peu plus d'oxygène absorbé par la combustion qu'il n'en faudrait pour faire de l'oxyde de carbone et de l'hydrogène. Cela tient probablement à ce qu'un peu de vapeur huileuse a échappé à la ponce sulfurique. Les nombres obtenus dans toutes les analyses faites sur les gaz de la carbonisation en meules portent à conclure qu'il n'y a dans les gaz permanents de la distillation du bois que de l'hydrogène sans mélange d'hydrogène carboné.

J'ai déterminé la proportion des produits liquides de la distillation dans une seule expérience faite immédiatement après l'aspiration du gaz (11) et j'ai obtenu :

Gaz aspiré.....	$0^{lit},750$
Différence de niveau..	$0^{m},20$
Baromètre.....	$0^{m},736$
Thermomètre.....	15°
Gaz sec à 0 degré et à $0^{m},760$...	$0^{lit},665$
Produits liquides condensés. ...	$1^{gr},870$

Ce qui donne les résultats suivants :

Produits liquides sur 1 litre de gaz sec, ramené à 0 degré et à $0^{m},760$.....	$2^{gr},812$

Cette proportion de produits liquides correspond au commencement de la distillation.

Si l'on compare les nombres qui viennent d'être obtenus avec ceux trouvés plus haut pour la carbonisation en meules, on verra se confirmer le résultat que j'ai annoncé relativement à la manière dont l'oxygène de l'air agit sur le combustible. En retranchant comme nous l'avons fait, dans chaque analyse, l'azote et l'acide carbonique correspondant, le reste représente la composition des gaz produits par distillation et donne des nombres qui se rapprochent beaucoup de ceux de la distillation en vases clos. On voit, dans les deux cas, la proportion de l'hydrogène augmenter beaucoup à la fin de la distillation, en même temps que

l'acide carbonique et l'oxyde de carbone diminuent. Je ferai remarquer ici qu'il y a identité entre la composition des gaz produits à la fin de la distillation en vases clos (11) et les résultats des expériences (8) et (9), faites sur les gaz qui indiquent l'achèvement de la carbonisation dans la partie de la meule d'où ils se dégagent. L'analogie est moins complète entre les résultats de l'expérience (10) et ceux qui correspondent aux fumées blanches et épaisses dans la carbonisation en meules des expériences (1) à (7). La différence entre les résultats (1) à (7) et ceux des expériences (8) et (9) est beaucoup moindre qu'entre ceux des expériences (10) et (11). Cela tient sans doute à ce que les produits qui se dégagent au moment de l'ouverture des évents ne correspondent pas intégralement à du bois dont la distillation commence, mais bien à un combustible dont le degré d'altération est variable. L'apparition des fumées claires indique au contraire que l'air ne traverse plus qu'un combustible de composition uniforme, et les résultats de la distillation doivent alors être bien comparables à ceux obtenus dans la même période de la carbonisation en vases clos.

Les proportions respectives d'acide carbonique, d'oxyde de carbone et d'hydrogène dans les gaz de la carbonisation en vases clos, étant à très-peu près les mêmes que dans les gaz de la carbonisation en meules, après la soustraction de l'azote et de l'acide carbonique correspondant, nous pouvons tirer de ce fait les deux conclusions suivantes, qui me paraissent fondamentales pour la théorie de l'opération.

1°. L'oxygène de l'air qui pénètre dans la meule par les évents d'admission, se change complétement en acide carbonique, sans mélange d'oxyde de carbone.

2°. L'oxygène de l'air se porte en entier sur le charbon déjà formé et son action est nulle sur les produits de la distillation du bois, en sorte que celle-ci s'opère de la même manière qu'en vases clos.

Ces deux principes, une fois posés, nous permettent d'ap-

précier assez nettement ce qui se passe dans la carbonisation en meules. Nous avons vu qu'on allumait la meule par le centre et que l'on conduisait l'opération en perçant des évents du sommet à la base du cône. La carbonisation s'opère donc du haut en bas, et du centre à la circonférence. La surface de séparation entre le charbon déjà formé et le bois me paraît être celle d'un tronc de cône renversé dont l'axe serait le même que celui de la meule, et dont l'angle irait constamment en augmentant à mesure que la carbonisation s'approcherait de la base de la meule. Cette manière de concevoir la marche de l'opération me paraît s'accorder en tous points avec les résultats des analyses qui précèdent et avec les circonstances que présente la carbonisation. En effet, pour concevoir que l'oxygène de l'air se change seulement en acide carbonique, il faut nécessairement admettre que l'air ne traverse pas une épaisseur un peu considérable de charbon incandescent, et qu'ainsi la combustion du charbon s'opère constamment à la surface de séparation entre le charbon produit et le bois incomplétement carbonisé. Le refroidissement dû à l'absorption de chaleur latente produite par la distillation du bois s'oppose à ce que l'acide carbonique, premier produit de la combustion, puisse se changer en oxyde de carbone, car on sait que cette transformation a besoin, pour s'effectuer, d'une température élevée.

Il est facile de concevoir comment l'air doit constamment circuler entre le charbon déjà formé et le bois incomplétement carbonisé. Cette surface de séparation correspond évidemment au maximum de vide qui existe dans la meule. Le tassement qui s'opère pendant la carbonisation est produit par l'affaissement et la rupture du charbon qui, une fois formé, n'est plus assez résistant pour supporter le poids de la partie supérieure de la meule. D'un autre côté, le bois en se carbonisant éprouve une forte contraction. On conçoit donc comment il doit y avoir une grande solution

de continuité entre le charbon et le bois incomplétement carbonisé, mais encore assez résistant pour ne pas se briser. Il est donc tout naturel que le tirage s'établisse le long de cette surface de séparation. Je dois aussi faire remarquer que les évents de dégagement cessent de donner des gaz, quand la carbonisation est achevée dans la partie de la meule qui leur correspond, sans que le charbonnier soit obligé de les boucher, et ce fait prouve bien que le charbon une fois formé et ayant pris son tassement, n'est plus guère perméable au courant de gaz.

On peut comparer ce qui se passe dans la carbonisation en meules avec le résultat qu'on obtient lorsqu'on transforme complétement l'oxygène de l'air en oxyde de carbone et que la chaleur sensible conservée par le courant de gaz sert pour carboniser le bois. Ceci a lieu lorsqu'on injecte de l'air forcé dans un petit fourneau à cuve alimenté par du bois en nature. On verra plus loin, dans un autre Mémoire, les détails de cette expérience qui m'a permis de tirer cette conclusion : *La quantité de chaleur absorbée par la distillation du bois simplement desséché à l'air est à très-peu près égale à celle développée par la transformation en oxyde de carbone du carbone produit par cette distillation.*

Je rappellerai ici que la température des gaz et des vapeurs, à leur sortie du générateur, n'était que de 125 degrés, et que l'on avait consommé 17,5 de charbon passé à l'état d'oxyde de carbone pour distiller 100 parties de bois et expulser 82,5 de principes volatils, ou 21,2 de charbon pour 100 parties de matières volatiles.

Pour comparer ces résultats avec ceux de la carbonisation en meules, je ferai remarquer que la moyenne de la composition des gaz des évents ne correspondra pas à la moyenne de toutes mes expériences, parce que la fumée bleuâtre et presque transparente qui correspond aux analyses (6), (7), (8), (9) est très-peu abondante et ne se dégage que pendant peu de temps. On se trouvera beaucoup

plus près de la vérité en prenant la moyenne des expériences (1) à (5) qui correspondent à un dégagement de vapeurs abondant et soutenu régulièrement pendant un long espace de temps. Si l'on prend cette moyenne et celle des expériences (1) et (2) pour la proportion des produits liquides, on trouve :

Acide carbonique.. ...	26,74
Oxyde de carbone.....	10,02
Hydrogène.....	9,92
Azote.....	53,32
	100,00
Produits liquides sur 1 litre de gaz.	1^{gr},027

En retranchant l'azote et l'acide carbonique correspondant, on trouvera sur 1 litre de gaz :

Azote.....	0^{lit},5332			
Acide carbonique.	0^{lit},1400	contenant carbone.		0^{gr},0756
	0^{lit},6732			
Produits de la distillation.	Acide carbonique...	0^{lit},1274	poids	0^{gr},252
	Oxyde de carbone..	0^{lit},1002	»	0^{gr},124
	Hydrogène.....	0^{lit},0992	»	0^{gr},009
		0^{lit},3268		

Poids des gaz.....	0^{gr},385
Produits liquides.....	0^{gr},027
Total des matières expulsées par distillation.	1^{gr},412

Pour expulser 1 gramme de matières volatiles, on a donc consommé dans la carbonisation en meules 0^{gr},0535 de carbone, c'est-à-dire les 0,252 seulement de la quantité consommée lorsqu'on emploie la chaleur sensible de l'oxyde de carbone pour carboniser le bois. En déduisant ce coefficient des expériences de Dulong sur les chaleurs de combustion, on trouverait 0,20, puisque les quantités de chaleur dégagées par la formation de l'oxyde de carbone et de l'acide carbonique, au moyen de la même quantité de car-

bone, sont dans le rapport de 1 à 5. Mais il faut noter que la chaleur sensible des gaz et des vapeurs qui se dégagent des évents des meules s'est toujours trouvée comprise entre 230 et 260 degrés, tandis que, dans le fourneau à cuve, la température des gaz n'était que de 125 degrés à leur sortie de l'appareil. On doit remarquer aussi que la composition chimique des produits de la distillation n'est pas tout à fait la même dans les deux cas, puisque le résidu de charbon qu'elle fournit est bien moindre dans le fourneau à tuyère que dans la carbonisation en meules. Mais l'accord est bien satisfaisant et l'on peut en conclure que, par la comparaison des résultats de la carbonisation en meules avec ceux obtenus par la combustion du bois dans un fourneau à cuve, on serait arrivé directement à la démonstration de ce fait, que l'acide carbonique absorbe une grande quantité de chaleur latente en se transformant en oxyde de carbone.

En comparant la composition des produits de la distillation dans les deux cas, lorsqu'on opère en meules ou dans le fourneau à cuve, on trouve, ainsi qu'on le verra plus loin :

	Produits de la distillation en meules.	Produits de la distillation dans le fourneau à cuve.
Acide carbonique....	39,0	30,7
Oxyde de carbone...	30,6	25,8
Hydrogène.....	30,4	43,5
	100,0	100,0
Poids du litre..	1^{gr},178	0^{gr},996
Produits liquides sur 1 litre de gaz sec...	3^{gr},142	3^{gr},030

La différence qu'on observe entre la composition des deux gaz tient à deux causes principales : 1° à ce que, dans le petit fourneau à cuve, l'analyse représente la composition des produits volatils qu'abandonne le bois pour se trans-

former en charbon pur, tandis que dans les meules on laisse dans le charbon 10 à 12 pour 100 de matières volatiles à peu près entièrement gazeuses et dans lesquelles l'hydrogène est très-dominant; 2° à ce que la distillation s'opérant plus rapidement dans le petit fourneau à cuve que dans les meules ou en vases clos, il y a moins de charbon produit et moins de matières volatiles liquides dans les produits de la distillation.

Nous venons de voir que dans la carbonisation en meules la proportion de charbon consommée était de $0^{gr},0756$ pour $1^{gr},412$ de produits volatils (1). Si l'on admet que la quantité de charbon formée par distillation soit les 25 pour 100 du poids du bois, comme on l'a trouvé par la carbonisation en vases clos, il est facile d'en déduire que, sur 25 de charbon produit, il s'en brûle postérieurement à la distillation 4 parties, en sorte que l'opération devrait donner 21 parties de charbon pour 100 parties de bois.

Nous pouvons déterminer la caloricité moyenne des produits de la distillation. En effet, pour $0^{gr},0756$ de carbone passé à l'état d'acide carbonique, il y a 550 unités de chaleur dégagées, et comme le poids total des produits de la distillation est de $1^{gr},412$, il en résulte que pour 1 gramme de matières volatiles, il y a eu 389 unités de chaleur absorbées. Cette quantité de chaleur est notablement plus forte que celle trouvée pour les produits de la distillation dans le fourneau à cuve, et cette différence tient sans doute aux mêmes causes que les différences observées dans la composition des gaz.

Il est facile de concevoir comment, dans la carbonisation

---

(1) J'ai supposé, dans tout ce qui précède, que l'oxygène de l'air ne fournit que de l'acide carbonique; comme son action s'exerce sur du charbon formé qui retient encore une proportion notable d'hydrogène et d'oxygène, il est probable que la réaction n'est pas tout à fait aussi simple que je l'ai considérée; mais cela ne change en rien les conséquences que j'ai déduites de mes expériences.

en meules, l'oxygène de l'air doit se porter sur le charbon déjà formé plutôt que sur les produits de la distillation. Les gaz sont accompagnés d'une proportion trop considérable de vapeurs peu ou point combustibles et dont le calorique spécifique est trop fort pour que leur inflammation soit facile. Nous avons vu, dans la carbonisation en vases clos, que les gaz ne devenaient combustibles que pendant la dernière période de la distillation. On sait aussi que le charbon de bois devient plus combustible par une calcination ménagée. Tous ces faits sont bien d'acord avec les résultats que j'ai tirés de mes expériences.

La distillation lente du bois produit, comme on sait, et toutes choses égales d'ailleurs, une proportion de charbon bien plus grande que la distillation rapide. Celle-ci fournit une proportion de charbon d'autant plus grande, jusqu'à une certaine limite, que la quantité de bois soumise à l'expérience est plus considérable; enfin, on sait que la dessiccation préalable du bois permet d'obtenir une proportion de charbon plus forte que celle qu'on pourrait retirer du bois vert. Ces résultats me paraissent faciles à expliquer. Chacun des principes organiques immédiats qui entrent dans la composition du bois éprouve, à un certain degré de température, une altération d'où résulte un produit pyrogéné fixe, un produit pyrogéné volatil et un dégagement de gaz provenant de la combustion d'une partie du carbone et de l'hydrogène par l'oxygène contenu dans le bois. Pour chaque température il s'établit un certain équilibre; à une température plus élevée, l'équilibre est détruit de nouveau, et il y a formation de nouveaux produits pyrogénés, les uns fixes, les autres volatils, jusqu'à ce qu'enfin il ne reste plus que du charbon pur. Si nous opérons à une température bien graduée et maintenue constante pendant un temps suffisant, chacune de ces modifications dans l'état des composés organiques pourra avoir lieu jusqu'au centre du morceau de bois, de façon à produire un nouvel agrégat

homogène, et sans qu'il y ait réaction entre les produits de la distillation qui viennent du centre du morceau sur les produits fixes qui se trouvent à la surface. Si, au contraire, le combustible est placé dans un milieu entretenu à une température très-élevée, comme cela a lieu dans la carbonisation rapide, il arrivera que les couches extérieures du bois seront à un état d'altération très-avancé lorsque le centre sera encore à l'état naturel. Il pourra donc y avoir réaction entre les produits de la distillation venant du centre sur le charbon déjà formé à la surface et qui se trouve maintenu par le rayonnement des parois du vase à une température élevée. Cette réaction donnera lieu à des gaz hydrogène, acide carbonique et oxyde de carbone, et à une perte correspondante sur le charbon. Les différences qu'on observe dans le rendement que donne la distillation du bois, dans différentes circonstances, me paraissent devoir être attribuées à ce que les produits primitifs de cette distillation, qui sont les mêmes dans tous les cas, réagissent plus ou moins, en raison de la température du milieu ambiant, sur le charbon déjà formé. Cette circonstance ne permet pas, quant à présent, de tirer de la composition des gaz de la carbonisation en vases clos quelques conséquences théoriques sur leur mode de production. Le seul résultat qui puisse en être déduit paraît être que la proportion d'hydrogène libre dans les gaz est beaucoup plus considérable à la fin de la distillation que dans le commencement, tandis que les proportions respectives d'acide carbonique et d'oxyde de carbone n'éprouvent pas de changements notables. Le même fait peut se constater sur les gaz de la distillation en meules, sauf quelques anomalies.

L'explication de la conduite de l'opération dans les diverses méthodes de carbonisation en tas où l'on sacrifie une partie du combustible pour distiller l'autre, me paraît pouvoir se déduire sans difficulté des deux conséquences principales que j'ai tirées de mes expériences. Ainsi il faut que

l'air destiné à la combustion entre constamment dans le tas à la séparation entre le charbon formé et le bois incomplétement distillé, pour éviter que son oxygène ne passe en partie à l'état d'oxyde de carbone. De là la nécessité d'empêcher qu'il ne reste des vides au centre de la meule.

On peut s'assurer que toutes les circonstances de la carbonisation en meules couchées suivie en Autriche (1) s'expliquent, d'après les considérations qui précèdent, avec plus de facilité encore que celles de la carbonisation en meules suivant la méthode ordinaire. Dans ce procédé, on fait marcher la carbonisation de l'avant à l'arrière de la meule, qui se trouve disposée sur une base rectangulaire allongée et de façon à ce que sa section par un plan vertical parallèle aux longs côtés du rectangle présente presque un triangle rectangle. On allume le feu à la partie extérieure de la meule qui est la plus basse, et l'on ouvre les évents en s'avançant vers l'autre extrémité. Une fumée d'un bleu clair annonce la fin de la carbonisation dans cette partie de la meule. On retire déjà du charbon à la partie antérieure, lorsque le *lieu de la distillation* se trouve à 2 ou 3 mètres de distance. Je n'entrerai pas ici dans de plus grands détails sur cette opération. Je ferai seulement remarquer que là le charbon se trouve formé d'abord à la partie antérieure et au sommet de la meule, c'est-à-dire dans les parties extérieures, tandis que, dans les meules françaises, le charbon formé se trouve enveloppé par du bois non carbonisé. Il est facile de concevoir que cette dernière disposition est bien plus favorable que celle des meules couchées pour éviter la perte de chaleur due au rayonnement de l'enceinte, et surtout pour dépouiller le mieux possible de la chaleur développée les produits de la combustion du charbon par l'air.

Je dois, en terminant, appliquer les résultats obtenus

---

(1) *Voyez* le Mémoire de MM. Foy, Harlé et Gruner, *Annales des Mines*, t. VII, p. 3; 3e série; et le Mémoire de M. Gruner, t. XIII, p. 595.

dans ce Mémoire à l'examen d'un problème qu'on se propose depuis quelques années, la fabrication en forêt du bois torréfié ou charbon roux. Il me paraît bien difficile d'arriver, sous ce rapport, à un procédé pratique, en opérant à peu près de la même manière que dans la carbonisation en meules. Pour qu'il en fût ainsi, il faudrait qu'il n'y eût pas de charbon formé dans l'intérieur de la meule et que l'oxygène de l'air pût brûler les produits de la distillation du bois. Or l'expérience nous prouve que l'oxygène se porte au contraire en entier sur un combustible ne contenant plus que peu de parties volatiles. La température développée par cette combustion va constamment en s'abaissant à mesure que le courant de gaz brûlé se rapproche de la surface de la meule en se chargeant des produits de la distillation du bois. La température est donc nécessairement très-variable, et de là la difficulté d'obtenir un combustible homogène. Pour avoir du charbon roux dans la plus grande partie de la meule, il faudrait que la température des gaz en contact avec le bois ne dépassât pas une certaine limite, et ce résultat me paraît bien difficile à réaliser dans tous les procédés, quels qu'ils soient, où la distillation s'opérera par la chaleur de combustion d'une partie du charbon brûlé.

Le procédé de M. Echement, qui a été décrit par M. Sauvage (1), est fondé sur un tout autre principe. Il consiste à projeter au milieu de la masse du bois les produits de la combustion du bois menu, de branchages, opérée dans un foyer en dehors de la meule au moyen d'un courant d'air forcé. M. Sauvage a calculé que la quantité d'air projeté par le ventilateur employé était cinq fois plus considérable que celle nécessaire pour la combustion du bois. Les produits de cette combustion, renfermant beaucoup d'air en excès, suivent un long canal sur lequel le bois est empilé

(1) *Annales des Mines*, t. XVIII, p. 677.

en forme de voûte, et s'échappent ensuite de toute la surface de la meule, recouverte comme à l'ordinaire par une couche de terre et de fraisil. On cherche ici à éviter l'inflammation du bois contenu dans la meule. Il fallait pour cela que le courant de gaz et d'air non brûlé qui la traverse n'eût pas une température trop élevée. C'est le résultat auquel on arrive en augmentant beaucoup la masse d'air par rapport aux produits de la combustion. Il est évident que plus leur température sera basse, plus leur masse sera considérable, et plus il y aura d'homogénéité dans la nature du combustible obtenu. Mais on conçoit qu'on ne pourra pas atteindre ce résultat d'une manière absolue, et que le bois placé près du conduit sera toujours à un état plus avancé d'altération que dans la partie supérieure et surtout à la base de la meule.

Quant aux modifications à introduire dans le procédé actuel de la carbonisation en meules, il est clair que si l'on parvenait à produire la chaleur et l'acide carbonique au moyen de combustibles ayant peu de valeur, comme du menu bois ou du menu charbon, on réaliserait ainsi une amélioration importante. Le procédé de Marcus Bull qui remplissait les vides laissés dans le dressage des meules par du menu charbon, du fraisil, et qui obtenait ainsi un plus fort rendement, paraît fondé sur le principe théorique que je viens d'énoncer.

Résumé.

Les principales conclusions qu'il est permis de tirer de ce travail sont les suivantes.

1°. En comparant la composition des gaz qui s'échappent des évents pratiqués à la surface des meules de carbonisation avec celles des gaz produits dans la carbonisation du bois en vases clos, on arrive à reconnaître : 1° que l'oxygène de l'air introduit dans la meule par les évents d'admission se change complétement en acide carbonique sans mélange

d'oxyde de carbone; 2° que cette combustion a lieu sur du charbon déjà formé et non sur les produits de la distillation du bois.

2°. La comparaison des résultats de la carbonisation du bois en meules avec ceux qu'on obtient en transformant le charbon en oxyde de carbone au lieu d'acide carbonique, fournit une vérification directe de ce fait, que l'acide carbonique absorbe une grande quantité de chaleur, en se changeant en oxyde de carbone.

3°. La carbonisation s'opère dans la meule du haut en bas et du centre à la circonférence. La surface de séparation entre le charbon formé et le bois incomplétement carbonisé, paraît être celle d'un tronc de cône renversé, ayant le même axe et la même hauteur que la meule, mais dont l'angle irait constamment en augmentant à mesure que la carbonisation s'approche de la base.

4°. On ne peut guère admettre qu'on puisse arriver à fabriquer du bois torréfié ou charbon roux par un procédé analogue à celui de la carbonisation en meules, en raison de la manière dont la combustion a nécessairement lieu dans l'intérieur des tas.

5°. L'emploi de combustibles sans valeur, comme le menu bois ou le menu charbon, paraît être le meilleur moyen d'augmenter le produit des meules de carbonisation.

III.

Notice sur une expérience relative à la carbonisation du bois en meules.

Les expériences dont j'ai donné les résultats, dans le Mémoire précédent (p. 109), sur la composition des gaz qui se produisent dans la carbonisation du bois en meules

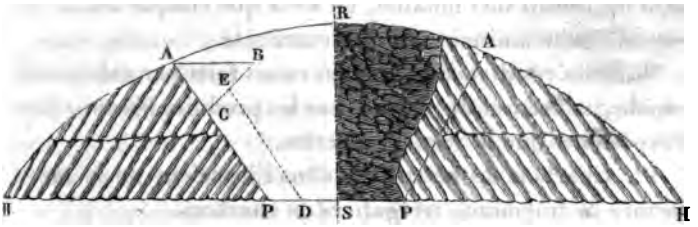
et en vases clos, m'avaient conduit à quelques conclusions relatives à la manière dont se propage la carbonisation dans l'intérieur des meules. Dans le but de vérifier si ces conclusions étaient exactes, M. Boulart, directeur des usines à la compagnie d'Audincourt, a bien voulu, sur ma demande, faire exécuter une expérience directe. Après avoir monté et mis en feu une meule de carbonisation, suivant la méthode ordinaire, on l'a découverte vers le milieu de l'opération, afin de juger de quelle manière la carbonisation s'était propagée dans son intérieur. Je vais indiquer avec quelques détails les circonstances de l'expérience et les résultats obtenus.

On a construit sur une aire tout à fait plane une meule renfermant 30 stères de bois, qui a été montée d'après le procédé ordinaire des forêts. Le bois à carboniser était d'essences mêlées, chêne, hêtre et sapin principalement, et avait été scié en bûches de $0^m,70$ de longueur. On avait réservé au centre de la meule, et sur toute sa hauteur, une cheminée de $0^m,25$ de diamètre, autour de laquelle le bois a été rangé circulairement sur trois étages, les grosses bûches au centre, et le menu bois à l'extérieur. La meule avait 7 mètres de diamètre et 2 mètres environ de hauteur. On l'a recouverte, comme à l'ordinaire, de terre et de fraisil sur toute sa surface, et mise en feu le 17 octobre 1844, au matin, en projetant du charbon allumé par la cheminée. On a laissé celle-ci découverte pendant quelques heures. Des évents pratiqués à la base sur tout le pourtour de la meule, et qui sont restés ouverts pendant toute la durée de l'opération, servaient à l'introduction de l'air qui alimentait la combustion. Quand la meule a été suffisamment allumée, on a fermé la cheminée, après l'avoir remplie de menu bois, et on a laissé le tout en repos jusqu'au soir, époque à laquelle on a découvert le haut de la meule pour remplir, avec de la braise, le vide qui s'était formé dans la cheminée. La même opération a été répétée le 18 au matin.

Dans le courant de cette journée, on a commencé à percer des évents de dégagement dans la couverture de la meule et tout près du sommet. La fumée qui en sortait aussitôt après leur ouverture était blanche, épaisse et fort abondante. Après quelques heures, la fumée devenait bleuâtre, presque transparente et fort peu considérable, et le charbonnier perçait alors de nouveaux évents à 20 ou 25 centimètres au-dessous du plan des précédents.

Le 19 octobre au soir, le plan des évents de dégagement étant à $1^m,20$ au-dessus du sol, on a enlevé une moitié de la meule. Cette opération a été assez pénible, en raison de l'abondance de la fumée; le bois et le charbon embrasés ont été éteints avec de l'eau.

Fig. 1.



La *fig.* 1 montre la répartition du bois et du charbon dans l'intérieur de la meule. Le charbon était contenu tout entier dans le volume qui serait engendré par la surface ARSP, tournant autour de l'axe RS. C'est à peu près un tronc de cône renversé, dont la petite base, qui se trouvait sur le sol, avait seulement $0^m,40$ de rayon. Toute la partie de la meule qui serait engendrée par la révolution du triangle APH autour de l'axe RS, était formée par du bois non altéré. L'extérieur des bûches était seulement noirci par du goudron, et toutes avaient une forte odeur empyreumatique; mais en entamant le bois avec une scie, il était facile de reconnaître, à son aspect seul, qu'il n'avait pas même éprouvé de commencement de dessiccation. Toute

la partie centrale de la meule ARSP était du charbon, et la majeure partie de celui-ci était en morceaux placés irrégulièrement les uns sur les autres, comme dans un tas de charbon, sans aucune liaison avec le bois qui formait la partie extérieure de la meule. Il n'y avait que la partie de la meule correspondante au triangle ABC et à l'espace compris entre la génératrice du cône AP et la ligne parallèle DE, où le charbon, déjà formé sur chaque bûche, restait attaché à celle-ci. La distance entre DE et AP était de 10 à 15 centimètres. Sur chacune des bûches qui se trouvaient atteintes par la génératrice du cône AP, on peut observer le passage du charbon parfait au bois non altéré; 7 à 8 centimètres de bois bruni séparent le charbon noir du bois à l'état normal. La partie de la bûche qui est charbonnée a subi un retrait fort notable, en sorte que chaque bûche paraît avoir été amincie vers son extrémité.

Voici les résultats de quelques essais faits par calcination rapide, au creuset de platine, sur les produits obtenus dans l'expérience que je viens de décrire.

1°. Charbon de hêtre pris dans l'intérieur de la masse formée de fragments irréguliers de charbon.

Charbon.....	78,8
Matières volatiles combustibles	13,2
Eau hygrométrique.....	6,0
Cendres calcinées.....	2,0
	100,0

2°. Bûche de chêne de $0^m,10$ de diamètre et de $0^m,70$ de longueur. Cette bûche était encore entière. L'extrémité supérieure était charbonnée sur $0^m,10$ environ de longueur; il y avait à peu près 8 centimètres de bois bruni, et le reste de la bûche avait conservé sa couleur primitive. L'écorce était parfaitement intacte. On reconnaissait facilement que la bûche n'avait pas été brisée à son extrémité supérieure, qui se trouvait limitée dans l'espace compris entre AP et DE. J'ai essayé séparément, 1° la

partie charbonnée; 2° le bois bruni; 3° le bois avec sa couleur primitive. J'ai obtenu :

	1. Partie charbonnée.	2. Bois bruni pris à 15 c. de l'extrémité de la bûche.	3. Bois pris à 30 c. de l'extrémité charbonnée.
Matières volatiles...	40,9	83,7	85,9
Charbon et cendres.	59,1	16,3	14,1
	100,0	100,0	100,0

3°. Un morceau de bois de sapin dans un état de carbonisation avancé, mais présentant encore dans son intérieur quelques fibres brunes, a donné :

Matières volatiles.....	41,8
Charbon et cendres.....	58,2
	100,0

Pour montrer jusqu'à quel point les résultats de l'expérience qui précède concordent avec les conclusions auxquelles j'avais été conduit par l'analyse des gaz qui se dégagent des évents, je citerai une partie du résumé de mon Mémoire sur les produits de la carbonisation.

« La carbonisation s'opère dans la meule du haut en bas » et du centre à la circonférence. La surface de séparation » entre le charbon formé et le bois incomplétement carbo- » nisé paraît être celle d'un tronc de cône renversé, ayant » le même axe et la même hauteur que la meule, mais dont » l'angle irait constamment en augmentant, à mesure que » la carbonisation s'approche de la base. »

L'expérience directe a confirmé, de la manière la plus nette, cette conclusion. On se représente très-bien, en effet, l'avancement de la carbonisation, en concevant que la génératrice AP du tronc de cône, qui forme la séparation entre le bois et le charbon, aille en s'inclinant de plus en plus sur le plan horizontal, jusqu'à ce qu'elle se confonde avec lui.

On conçoit pourquoi les produits de la combustion cir-

culent constamment le long de la surface engendrée par la ligne AP, avant d'arriver à l'évent de dégagement A. On voit en effet qu'entre DE et AP, le charbon formé n'est pas encore séparé du bois. Les charbons conservent donc là, les uns par rapport aux autres, la disposition symétrique qu'on avait donnée aux bûches; mais comme chaque morceau a éprouvé un retrait considérable en se charbonnant, il est clair qu'entre les lignes DE et AP l'intervalle qui sépare chaque bûche de sa voisine est beaucoup augmenté. Au contraire, dans toute la partie centrale de la meule, le charbon est brisé et entassé irrégulièrement. Le passage des gaz ne pourra donc pas avoir lieu à travers la masse du charbon, et l'on conçoit très-bien que le tirage doive s'établir le long de la surface engendrée par la ligne AP, qui correspond précisément au maximum de vide existant dans l'intérieur de la meule. A mesure que la carbonisation marche, le charbon formé à l'extrémité de chaque bûche devient de moins en moins résistant, et finit par se briser sous le poids qu'il supporte, celui de la partie supérieure de la meule. La masse du charbon en fragments irréguliers, qui occupe le centre de la meule, s'en augmente, et l'angle du cône s'élargit en même temps.

On trouve toujours au centre de la base de la meule une certaine quantité de menu charbon fortement calciné ou braise, dont la présence est facile à expliquer. En comparant, en effet, la composition des gaz qui sortent des évents avec celle des gaz produits par la distillation du bois en vases clos, j'en avais conclu que l'oxygène atmosphérique introduit dans la meule par les *trous de pied* se changeait complétement en acide carbonique en brûlant du charbon et non des produits de distillation. Cette combustion s'opère à la fois sur toute la circonférence de la base inférieure du tronc de cône, et probablement jusqu'à une certaine hauteur le long de la surface de celui-ci, et le mélange d'acide carbonique et d'azote produit dans cette partie de la meule

s'élève le long de la surface conique, en cédant sa chaleur au bois qui se distille, et en entraînant les produits de cette distillation. La braise qui se trouve toujours au cœur des meules avec une certaine proportion de cendres est certainement le résidu de cette combustion.

S'il ne se forme pas d'oxyde de carbone dans la combustion de charbon par l'oxygène atmosphérique, il convient de l'attribuer à ce que les produits de la distillation du bois viennent abaisser constamment la température des gaz, en sorte que la formation de l'oxyde de carbone n'est plus possible. Cette circonstance est fort avantageuse au succès de l'opération. Toute production d'oxyde de carbone aux dépens de l'acide carbonique occasionnerait non-seulement une perte en charbon, mais encore une grande absorption de chaleur latente, et j'ai démontré plus haut (p. 126) quelle énorme influence aurait la formation de l'oxyde de carbone sur le rendement de la meule en charbon.

Dans l'expérience qui vient d'être décrite, on n'a trouvé dans la meule qu'une proportion insignifiante de bois torréfié ou charbon roux. Le bois bruni ou torréfié existe sur chaque bûche, et établit la transition entre le bois à l'état naturel et le charbon. Le procédé de carbonisation en meules, tel qu'il est actuellement pratiqué, ne paraît donc pas susceptible de produire du charbon roux en quantité notable, et les principes sur lesquels la théorie de la carbonisation du bois en meules me semble clairement établie, montrent également le peu de probabilité de réussite des essais qui seraient tentés dans cette direction.

La meule d'essai avait été établie d'après le procédé ordinaire des forêts, sans aucune modication. J'ai décrit dans le Mémoire précédent sur la composition des gaz produits dans la carbonisation du bois, la modification qu'on avait fait subir à cette méthode à Audincourt, modification qui consistait à supprimer le vide de la cheminée et à déterminer la mise en feu du cœur de la meule, au moyen d'une

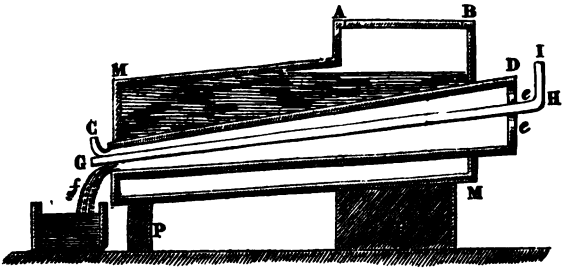
plaque de tôle chauffée par-dessous. L'emploi du procédé des meules à chaudières avait produit une amélioration très-notable sur le rendement en charbon. Depuis la rédaction de mon Mémoire, cette méthode a été remplacée par une autre qui est d'un emploi tout aussi avantageux quant au rendement et facilement applicable même en forêt. Voici en quoi elle consiste. Au lieu d'un seule cheminée au centre de la meule, on en établit deux concentriques; on monte la meule comme à l'ordinaire; puis on remplit l'intervalle annulaire compris entre les deux enveloppes de la cheminée par du menu charbon, mais jusqu'à la hauteur du premier étage seulement, $0^{m},70$ environ. Pour une meule de 50 à 60 stères de bois, on introduit 10 à 12 hectolitres de braise. On allume la meule par la cheminée centrale, et l'on conduit l'opération comme à l'ordinaire. Ce procédé est maintenant exclusivement employé dans tous les ateliers de charbonnage de la compagnie d'Audincourt, et les produits en sont au moins aussi avantageux que ceux obtenus par le procédé des chaudières. J'avais indiqué cette modification au procédé des forêts à la fin de mon Mémoire. Elle se déduit très-clairement des principes théoriques qui précèdent. En introduisant de la braise au centre de la meule et à sa base, on produit l'acide carbonique et la chaleur nécessaire à la carbonisation au moyen d'un combustible de peu de valeur, et le rendement du bois en charbon de bonne qualité s'en trouve forcément augmenté.

Je dois dire, en terminant, quelques mots sur un procédé qu'on pratique maintenant à Audincourt, et qui consiste à condenser les produits liquides entraînés avec les gaz des évents, et à utiliser ces produits pour la fabrication de l'acide acétique. Les produits liquides que l'on recueille sont tout à fait identiques à ceux que donne la distillation du bois en vases clos, et on les traite par les procédés qui sont en usage dans les fabriques de vinaigre de bois.

Le condenseur que l'on adapte aux évents de dégagement

est représenté *fig.* 2; c'est un vase cylindrique en fer-blanc M, de $0^m,90$ de longueur sur $0^m,40$ de diamètre. On le remplit d'eau froide par l'ouverture carrée AB, qui a $0^m,25$ de côté. Ce cylindre est traversé par un cône CD, dont la base supérieure a $0^m,15$ de côté, et la base inférieure $0^m,05$ seulement. Trois ouvertures *e*, *e*, *e*, pratiquées dans la base supérieure de ce cône, communiquent chacune avec un évent de dégagement au moyen d'un tuyau en fer-blanc. Les produits liquides s'écoulent dans un vase placé au-dessous du condenseur par l'orifice *f*. Les gaz s'échappent par un autre orifice pratiqué dans la base inférieure du cône. Pour rendre le refroidissement plus rapide, on a fait traverser le cône par un tuyau GHI qui débouche librement dans l'air à ses deux extrémités. Il s'établit un tirage d'air à travers ce tuyau, et la condensation des vapeurs dans l'intérieur du cône est beaucoup plus complète.

Fig. 2.



Les condenseurs sont placés sur le sol, appuyés sur une pièce de bois P. Les évents dans lesquels s'engagent les tuyaux de fer-blanc qui aboutissent au condenseur sont placés à $0^m,70$ du sol, et l'on peut produire la carbonisation du bois en ne perçant pas d'évents au-dessus de ceux-là : seulement l'opération marche plus lentement.

Une meule de 60 stères de bois mêlé a produit 1,800 litres d'acide pyroligneux brut, dont le prix de revient est extrêmement faible. Il est fort probable, d'après ces

résultats, que la fabrication du vinaigre de bois finira par se concentrer dans les grandes usines à fer pourvues d'un grand atelier de charbonnage, et qui pourront consacrer à cette fabrication une partie de leurs chaleurs perdues, comme cela se pratique actuellement à Audincourt.

IV.

Rapport sur les procédés de carbonisation employés par M. Popelin-Ducarre pour la fabrication du charbon de Paris.

M. Popelin-Ducarre fabrique depuis cinq ans un produit qui est connu du public sous le nom de *charbon de Paris*. Cette fabrication, qui prend tous les jours une extension plus grande, nous paraît devoir être signalée au nombre des industries les plus recommandables; elle permet d'utiliser de nombreux débris ligneux, des menus charbons sans usages jusqu'à présent, pour préparer un nouveau combustible qui paraît présenter des avantages économiques considérables dans un grand nombre d'emplois domestiques ou industriels.

L'idée de préparer les combustibles en morceaux plus ou moins volumineux par l'agglutination de menus débris n'est pas nouvelle. Plusieurs brevets ont été demandés ou délivrés pour des inventions de ce genre : tantôt le combustible menu est aggloméré à l'aide d'une matière liquide ou molle, sans être soumis à une carbonisation préalable; tantôt, au contraire, le nouveau combustible aggloméré est soumis à une carbonisation qui lui permet de brûler sans flamme ni fumée.

Nous n'entrerons pas ici dans la description des procédés qui ont été imaginés pour préparer ces nouveaux combus-

tibles. Les seuls qui nous paraissent avoir donné des résultats pratiques, avant celui de M. Popelin-Ducarre, sont au nombre de deux. M. Marsais prépare depuis quelques années, dans le bassin de la Loire, par le procédé du moulage, de grosses briques formées de menus de houille agglutinés à chaud par un produit retiré du goudron. Ce nouveau combustible, qui brûle avec flamme et fumée, est surtout utilisé pour la navigation à vapeur. Il n'est pas comparable par sa composition au charbon de Paris.

L'autre produit est celui qui constitue ces briques économiques formées de menu coke agglutiné avec une argile très-plastique. Ce produit est caractérisé par sa difficile combustibilité; il a des usages spéciaux tout à fait distincts de ceux du charbon de M. Popelin-Ducarre.

L'agent d'agglutination dont se sert M. Popelin-Ducarre est le goudron des usines à gaz; on le mêle avec les menus débris du combustible qu'il s'agit d'utiliser. Le mélange est fortement comprimé et soumis à un moulage qui le façonne en cylindres. Les charbons agglomérés sont soumis à une nouvelle carbonisation. Le goudron, en se décomposant, laisse un résidu de charbon dur et brillant qui forme au milieu de la masse du combustible comme un réseau qui en soude toutes les parties. Le produit obtenu est très-peu friable, et peut être transporté à de bien grandes distances sans déchet bien notable.

On conçoit que le procédé dont nous venons de donner une idée bien sommaire, peut être appliqué à tous les débris charbonneux, qu'ils proviennent du bois, de la tourbe ou d'autres combustibles. On ne peut pas utiliser immédiatement les mêmes combustibles à l'état cru, à l'exception de la houille, en raison du retrait considérable qu'ils prennent à la carbonisation, et qui s'oppose à ce que le charbon obtenu ait quelque solidité.

Toutefois, et bien que le procédé indiqué puisse servir à l'agglomération de tous les débris de combustibles déjà car-

bonisés, nous pensons qu'il a surtout de l'importance et de l'avenir en ce qui concerne le charbon de bois. Le charbon préparé avec les menus débris provenant des matières ligneuses carbonisées est celui qui porte le nom de *charbon de Paris*. C'est à cette fabrication, la plus importante à beaucoup près, que se rapportent les détails qui suivent.

Préparation des menus charbons.

On peut tirer parti des charbons pulvérulents qui constituent, dans les usines à fer, les déchets de halle, et qui s'élèvent en moyenne à 10 pour 100 du charbon consommé dans ces usines. M. Popelin-Ducarre utilise ainsi des débris provenant des forges du Berri et de la Haute-Marne; mais il fabrique lui-même de grandes quantités de menus en carbonisant de nombreux débris ligneux presque sans valeur et dont l'enlèvement est souvent jugé très-utile à l'amélioration du sol forestier.

La carbonisation s'opère en forêt par un procédé très-simple. M. Popelin emploie maintenant un four portatif d'environ 2 mètres de hauteur sur 2 mètres de diamètre. Les parois de ce four sont formées par des plaques de fonte qu'on assemble avec facilité. Il a la forme d'un cylindre recouvert d'un tronc de cône très-surbaissé, par la base supérieure duquel se dégage la fumée. Une porte placée à la partie inférieure du four sert seulement pour retirer le charbon formé; elle reste fermée pendant toute la durée de la carbonisation. La fonte est entourée à l'extérieur d'un revêtement en terre de $0^m,50$ d'épaisseur, maintenu par des pieux et des madriers.

On met d'abord quelques faguettes dans le four, et on verse par-dessus une pelletée de charbon allumé. Quand la fumée disparaît, on remplit de nouveau le four avec des faguettes et on continue ainsi jusqu'à ce que le four ait absorbé 250 ou 300 faguettes, suivant sa capacité; on ferme alors la cheminée et on retire le charbon par la porte inférieure.

Le four vide est assez chaud pour servir immédiatement à une nouvelle opération.

Fabrication du charbon de Paris.

M. Popelin-Ducarre a établi dans son usine du boulevard de l'Hôpital les dispositions suivantes.

Le goudron des usines à gaz est reçu dans une vaste citerne qui peut en contenir 400,000 kilogr.; il est élevé par des pompes et conduit dans des réservoirs à portée des appareils où doit se faire le mélange. Les menus charbons sont d'abord broyés sous des meules coniques, puis mêlés sous des cylindres avec le goudron. On emploie 15 kilogr. de goudron pour 1 hectolitre de menus qui pèse environ 30 kilogr. Le mélange passe ensuite dans l'appareil à mouler qui le comprime fortement et le façonne en cylindres d'environ $0^m,10$ de long sur $0^m,03$ de diamètre; ces cylindres sont rangés dans des caisses rectangulaires en fonte, portées sur des chariots et qu'on introduit, au moyen de chemins de fer, dans des fours où s'opérera la carbonisation. Ces fours sont d'une construction très-ingénieuse; leur disposition est telle, que la combustion des produits fournis par la distillation du goudron suffit pour développer la chaleur nécessaire à la carbonisation elle-même. M. Popelin-Ducarre a le projet de placer à la suite de ces appareils un générateur à vapeur qui utilisera leur chaleur perdue et qui lui fournira les quinze chevaux de force nécessaires à la marche de son usine.

Le charbon de Paris, préparé par les procédés qui viennent d'être indiqués, s'embrase assez facilement; il brûle sans flamme ni fumée, avec une grande lenteur, en se recouvrant d'une couche épaisse de cendre; un morceau une fois bien allumé continue à brûler à l'air : ce qui le distingue nettement du coke. Cette lenteur dans la combustion rend le charbon de Paris particulièrement propre aux usages domestiques, surtout pour les classes ouvrières

et les petits ménages, à certains emplois dans les laboratoires de chimie et à beaucoup d'usages industriels pour lesquels il faut une chaleur soutenue et pas trop élevée.

Son prix est de 15 à 16 francs les 100 kilogrammes.

Il renferme une proportion considérable de cendres, de 20 à 22 pour 100, d'après les essais que nous avons faits (1). La valeur calorifique absolue n'est donc que les 0,8 de celle du charbon de bois. Les charbons de brindilles ne renfermant que 4 à 5 pour 100 de cendres, il y a lieu de penser que le surplus est fourni par les menus de halle qui renferment ordinairement une forte proportion de matières terreuses; il serait convenable que cette proportion de cendres déjà considérable ne fût jamais dépassée.

Cette grande proportion de cendres nuirait très-probablement à l'emploi du charbon de Paris, si l'on voulait s'en servir pour des usages qui exigent une température très-élevée.

V.

Recherches sur la carbonisation de la houille et expériences sur la composition des gaz qui se dégagent des fours à coke.

La carbonisation de la houille s'opère, comme on sait, par deux méthodes principales : tantôt on carbonise en meules ou en tas, tantôt dans des fours particuliers. La première méthode est usitée surtout dans les localités où la houille est à très-bas prix. Ses inconvénients sont d'exiger l'emploi de houille en assez gros morceaux, de ne donner

(1) Les cendres n'ont pas été calcinées; la chaux est à l'état de carbonate dans le charbon de Paris qui fait une vive effervescence avec les acides.

qu'un coke léger, et d'occasionner des déchets assez considérables.

La carbonisation de la houille dans les fours spéciaux s'exécute avec plus de régularité et d'économie que la carbonisation en meules. On emploie cette méthode à l'usine de Seraing pour obtenir le coke nécessaire au service des hauts fourneaux. J'ai eu occasion, en septembre 1848, de suivre cette carbonisation et j'en ai profité pour recueillir les gaz qui se dégagent de ces fours, dans l'espoir que leur analyse pourrait éclaircir ce qui se passe pendant cette opération. Il y avait lieu, en effet, de rechercher si la chaleur employée pour la carbonisation de la houille était produite par la combustion même des produits de la distillation, ou par la combustion d'une portion du coke laissé pour résidu, ou bien si les deux effets se produisaient simultanément; si l'oxygène de l'air introduit dans le four se changeait en acide carbonique ou en oxyde de carbone. Toutes ces questions pouvaient être résolues par l'analyse des gaz recueillis dans les cheminées des fours.

Avant d'indiquer les résultats des analyses, j'inscrirai ici quelques renseignements relatifs à la construction et au roulement des fours à coke sur lesquels j'ai opéré.

Les fours employés à Seraing ont deux portes placées aux deux extrémités de la sole, dont la forme est celle d'un rectangle terminé par deux trapèzes. La voûte est cylindrique au-dessus du rectangle et conique au-dessus des trapèzes. Il y a trois cheminées, l'une au centre de la voûte cylindrique, et les deux autres au point de raccordement de la partie cylindrique avec les voûtes coniques. La détermination des dimensions de ces cheminées a de l'importance, puisqu'elles règlent l'admission de l'air dans le four et par conséquent la marche de la carbonisation. La cheminée centrale a une surface égale à celle des deux autres réunies. Du reste, on ne se sert jamais en même temps des trois cheminées : on ferme les deux cheminées latérales lorsqu'on

emploie celle du centre, et réciproquement. La cheminée centrale conduit les gaz qui s'échappent du four à coke sous une chaudière à vapeur qui alimente la machine motrice de la soufflerie des hauts fourneaux. Huit fours à coke sont ainsi assemblés dans le même massif et produisent ensemble une quantité de vapeur suffisante pour une machine de 80 chevaux. Une lame d'air peut être introduite dans le carneau de la chaudière au-dessous de chacune des cheminées pour brûler les gaz combustibles. Quand on n'utilise pas de cette manière la chaleur perdue, on ferme la cheminée, à l'aide d'une glissière en terre réfractaire, et l'on fait dégager les produits gazeux par les deux petites cheminées latérales. Je ne donnerai pas, du reste, ici de plus grands détails sur la construction de ces fours à coke : on les trouvera dans l'excellent ouvrage que vient de publier M. Valérius sur la fabrication de la fonte (p. 256 et suiv.).

Les houilles employées à Seraing pour la fabrication du coke appartiennent à la catégorie des houilles grasses et dures qui donnent un coke peu boursouflé, mais excellent pour le service des hauts fourneaux. Elles ont donné en moyenne à l'analyse immédiate les nombres suivants :

Coke	Carbone....	78,00
	Cendres....	2,00
Matières volatiles....		20,00
		100,00

Ces houilles peuvent être comparées à la houille de Rochebelle, près Alais, dont l'analyse a donné à M. Regnault :

Carbone.....	89,27
Hydrogène.....	4,85
Oxygène et azote.	4,47
Cendres.....	1,41
	100,00

Le coke fourni par la houille de Rochebelle est dur et

compacte; il convient parfaitement pour le haut fourneau. La houille de Rochebelle, essayée par calcination au creuset de platine, a laissé 78 pour 100 de son poids de coke, nombre très-voisin de celui qu'a donné la houille de Seraing. On peut donc admettre que l'analyse élémentaire rapportée ci-dessus représente bien la composition moyenne des houilles employées à Seraing pour la fabrication du coke.

Voici les principales circonstances de la carbonisation de la houille dans les fours à chaudière de Seraing :

On charge à la fois dans chaque four 3 mètres cubes de houille menue qu'on répartit sur la sole, aussi exactement que possible, en une couche de 0,33 de hauteur environ. Le chargement dure trois quarts d'heure. Les trois cheminées sont ouvertes toutes à la fois pour le soulagement de l'ouvrier. Le chargement étant terminé, on bouche, soit la cheminée centrale, soit les deux cheminées latérales; on ferme les portes sans les luter, et la carbonisation commence. On peut la partager en trois périodes : dans la première, qui dure environ trois quarts d'heure, on a seulement un dégagement de vapeur d'eau; la seconde période est d'environ une heure et demie. Les gaz s'allument et brûlent en partie avec une flamme rouge très-fumeuse; les cheminées sont complétement ouvertes; les portes sont fermées, mais non lutées. Dans la troisième période, les gaz brûlent très-bien, avec une flamme blanche et sans fumée. La houille paraît incandescente sur une épaisseur de 8 à 10 centimètres à partir de la surface; on lute les portes, en ménageant seulement une petite fente à la partie supérieure de la garniture d'argile. La cheminée reste complétement ouverte. Quand la flamme commence à diminuer, on bouche peu à peu, puis complétement, les fentes ménagées dans la garniture des portes, et l'on finit par fermer la cheminée quand il ne se dégage plus de flamme. La durée totale d'une carbonisation, y compris le chargement et le déchargement, est de vingt-deux à vingt-quatre heures.

Il est très-important de régler convenablement la quantité d'air qui pénètre dans le four, si l'on veut obtenir un rendement aussi grand que possible. On a reconnu que les houilles très-grasses exigent plus d'air que les houilles du genre de celles de Seraing, et qu'il fallait augmenter les ouvertures d'admission aux portes; autrement la carbonisation marcherait avec une très-grande lenteur. Quand il arrive trop d'air dans les fours, la carbonisation se fait trop vite; elle donne beaucoup de déchet, et le coke obtenu est peu compacte. Une carbonisation très-lente, qui durerait quarante-huit heures au lieu de vingt-quatre, donne, d'après M. Valérius, un coke très-dur et très-compacte.

Le rendement moyen des houilles que l'on carbonise au chantier de Seraing s'élève à 160 pour 100 en volume et à 67 pour 100 en poids.

J'ai aspiré les gaz qui se dégagent des cheminées de ces fours à coke à trois époques différentes de la carbonisation. Un tube en verre, recourbé à angle droit, plongeait de $0^{m},25$ environ dans la cheminée et communiquait par un long tube en caoutchouc avec le tube à recueillir les gaz, formé d'une partie renflée et de deux tubes beaucoup plus étroits soudés aux deux extrémités, et qui avaient été convenablement lutés. Deux robinets étaient placés aux deux extrémités du tube. Après avoir fait passer deux à trois litres de gaz dans l'appareil, on fermait les robinets, puis ensuite les tubes étaient scellés à la lampe, pour être ouverts seulement au moment de l'analyse.

Les analyses ont été faites dans l'eudiomètre de MM. Regnault et Reiset. L'acide carbonique a été absorbé par la potasse. On a fait détoner ensuite avec de l'oxygène, après avoir ajouté un peu de mélange détonant. On a noté la contraction survenue, puis l'acide carbonique a été absorbé par la potasse. Le résidu a été mêlé avec un excès d'hydrogène. On a fait détoner de nouveau, afin de pouvoir doser l'oxygène absorbé par la première combustion.

Des expériences faites sur chaque gaz, au moyen du phosphore, ont montré qu'ils ne renfermaient pas d'oxygène libre.

Voici les résultats obtenus :

	1. Après 2 heures.	2. Après 7 heures ½.	3. Après 14 heures.	Moyenne.
Acide carbonique.....	10,13	9,60	13,06	10,93
Hydrogène protocarboné.	1,44	1,66	0,40	1,17
Hydrogène.....	6,28	3,67	1,10	3,68
Oxyde de carbone.....	4,17	3,91	2,19	3,42
Azote.....	77,98	81,16	83,25	80,80
	100,00	100,00	100,00	100,00
Oxygène pour 100 volumes d'azote.....	15,7	14,2	17,0	15,6

(1) Gaz recueilli deux heures après la mise en feu d'une charge dans une des cheminées latérales d'un des fours; fumée noire et épaisse; flamme rougeâtre apparaissant par intervalles.

(2) Gaz aspiré sept heures et demie après la charge; flamme brillante, encore un peu rougeâtre; il n'y a plus de fumée.

(3) Gaz aspiré après quatorze heures de cuisson; flamme claire, peu volumineuse; la carbonisation paraît s'approcher de sa fin.

Examinons maintenant si les résultats des analyses qui précèdent peuvent nous fournir quelques renseignements sur la manière dont s'effectue la carbonisation.

Nous avons admis que la houille renfermait :

Hydrogène.....	4,85
Carbone.....	89,27
Oxygène et azote.....	4,47
Cendres.....	1,41
	100,00

La carbonisation dans les fours ne donne que 67 pour 100 de coke; les matières entraînées, soit par distillation, soit par combustion, renferment donc les éléments suivants :

Hydrogène.....	4,85
Carbone.....	23,68
Oxygène et azote.	4,47
	33,00

Le rapport du carbone à l'hydrogène est de 23,68 : 4,85, ou de 1 : 0,205 en poids.

Si nous considérons, au contraire, la composition moyenne des gaz, nous trouverons que le rapport du carbone à l'hydrogène est de 7,76 : 6,02 en volumes, et en poids de 1 : 0,064. On peut donc tirer de ce rapprochement cette conclusion que *plus des deux tiers de l'hydrogène contenu dans la houille sont brûlés pendant la carbonisation.*

Nous n'avons pas pu tenir compte, à la vérité, dans l'appréciation qui précède, de l'hydrogène et du carbone que renferment les produits condensables de la distillation, tels que les goudrons qui ne sont pas brûlés pendant la carbonisation; mais la proportion de ces produits condensables est peu considérable, en raison de la haute température que possède, pendant presque toute la durée de la carbonisation, l'enceinte dans laquelle elle s'opère. C'est seulement au commencement de l'opération qu'on les voit se dégager en quantité appréciable. La faible proportion de l'hydrogène carboné, par rapport à l'hydrogène et à l'oxyde de carbone que renferment les gaz permanents, doit être également attribuée à la haute température de l'enceinte.

La combustion d'une grande partie de l'hydrogène renfermé dans la houille est également prouvée par la comparaison de la quantité d'oxygène renfermé dans les gaz avec celle qui correspond à l'azote qu'ils renferment; la quantité d'oxygène combiné dans les gaz est en moyenne de 15,63 pour 100 d'azote, tandis qu'elle devrait être de 26,26, si

tout l'oxygène atmosphérique se retrouvait dans les gaz permanents de la combustion. La différence 10,63 représente l'oxygène qui a servi à brûler l'hydrogène. On voit que les 0,4 de l'oxygène de l'air introduit dans le four à coke ont été transformés en eau (1).

On peut également déduire de l'analyse des gaz le volume de l'air qui sera nécessaire pour la carbonisation, en comparant l'azote au carbone. Le rapport entre les volumes d'azote et de vapeur de carbone est en moyenne de 80,8 à 7,76 et en poids de 80,8 : 6,65, ou de 12,1 à 1. L'air atmosphérique renfermant 77 pour 100 de son poids d'azote, on trouve pour le rapport du poids de l'air introduit au poids du carbone contenu dans les gaz, celui de 15,8 : 1. Or la quantité de carbone entraînée par les gaz représente, comme nous l'avons vu plus haut, les 23,68 pour 100 du poids de la houille; le poids de l'air introduit pour la carbonisation est donc à celui de la houille comme 3,75 : 1. Il a donc fallu employer $2^{m.c}$,88 d'air pour chaque kilogramme de houille à carboniser, ou $7,922^{m.c}$ d'air pour $3^{m.c}$, ou 2,751 kil. de houille. Si la carbonisation a duré vingt heures, il est facile d'en conclure que le volume de l'air introduit dans le four a coke a été en moyenne de $0^{m.c}$,110 par seconde ou de $6^{m.c}$,60 par minute. C'est à peu près les deux tiers de la quantité d'air que reçoit un haut fourneau au charbon de bois produisant 2,000 kil. de fonte par vingt-quatre heures.

Nous pouvons rechercher maintenant, d'après les données qui précèdent, quelle est la valeur calorifique des produits gazeux de la carbonisation.

Les gaz renferment en moyenne 80,8 pour 100 d'azote qui étaient mêlés, dans l'air atmosphérique, à 21,2 d'oxy-

(1) On n'a pas tenu compte, dans ces appréciations, de l'oxygène qui est contenu dans la houille. La proportion de cet oxygène est très-peu considérable, et la correction à faire ne changerait rien aux conclusions énoncées.

gène. Les gaz du four à coke renferment 8,27 pour 100 de gaz qui, en brûlant, absorberont 5,89 d'oxygène. Le rapport de l'oxygène déjà employé pour la carbonisation à celui qui est nécessaire pour achever la combustion des gaz, est de 21,2 : 5,89, ou d'environ 7 : 2.

La chaleur perdue des fours à coke se compose de deux parties distinctes : 1° de la chaleur sensible que possèdent les gaz sortant du four; 2° de la chaleur qu'ils peuvent développer en se combinant avec une nouvelle proportion d'oxygène.

Il est facile d'évaluer cette dernière quantité de chaleur. L'hydrogène et l'oxyde de carbone dégagent, d'après Dulong, 3,130 unités de chaleur par litre en se combinant avec un demi-litre d'oxygène. L'hydrogène protocarboné dégage en brûlant 9,587 unités. Les gaz du four à coke dégageront donc en moyenne par litre 0,334 unités de chaleur en absorbant 0^{l},0589 d'oxygène. Le volume total des gaz est facile à déterminer. Nous avons trouvé que l'air introduit pendant toute la durée de la carbonisation était de 7,922 mètres cubes. Or chaque litre de gaz correspond à 1^{l},02 d'air atmosphérique, comme nous venons de le voir tout à l'heure; le volume total des gaz est donc de $\frac{7922}{1,02}$ ou 7,767 mètres cubes qui dégageront en brûlant 2,594,178 calories.

Cette quantité de chaleur de combustion n'est évidemment qu'une fraction de la chaleur perdue totale que nous allons essayer de déterminer par d'autres considérations.

La houille perd à la carbonisation 33 pour 100 de son poids, composés, comme nous l'avons vu, de

Hydrogène.....	5,85
Carbone.....	23,60
Oxygène	4,47
	33,00

Admettons que l'azote se trouve dans la houille dans la

proportion de 1,5 pour 100, l'oxygène nécessaire pour brûler complétement l'hydrogène et le carbone est de 101,95, et en déduisant 2,97 pour l'oxygène contenu dans la houille, de 98,98.

L'équivalent en carbone des 33 pour 100 de matières combustibles est de 37,12. Si nous admettons 8,080 pour le pouvoir calorifique du carbone pur, nous trouverons, d'après la loi de Welter, 3,000 unités pour la quantité de chaleur correspondant à 1 kil. de houille, et pour les 2,750 kil. de houille un produit de 8,250,000 calories. Ce nombre représente la totalité de la chaleur qui peut être dégagée par les produits gazeux de la carbonisation; mais il faut en déduire une partie employée à porter le coke à une température suffisamment élevée. La houille rend 67 pour 100 de coke, soit 1,842 kil. par 2,750 kil. de houille employée. Admettons qu'il faille chauffer le coke à 1000 degrés; sa chaleur spécifique, d'après M. Regnault, est de 0,20; la quantité de chaleur correspondante sera de 368,400 calories ou 4,5 pour 100 environ de la quantité totale; il reste donc 7,881,600 calories applicables à d'autres usages.

La chaleur de combustion des gaz a été trouvée tout à l'heure égale à 2,594,178 calories, ou seulement *le tiers de la quantité de chaleur perdue totale*. On voit que pour utiliser les chaleurs perdues des fours à coke d'une manière convenable, il faut placer les appareils le plus près possible des fours à coke, attendu que les deux tiers de la chaleur utilisable sont de la chaleur sensible, et que pour pouvoir brûler convenablement les gaz de ces fours il est indispensable que leur température soit encore suffisamment élevée.

Des résultats pratiques complétement satisfaisants ont été obtenus à Seraing dans l'application des chaleurs perdues des fours à coke au chauffage des chaudières à vapeur. Un massif de huit fours à coke alimente une chaudière de 80 chevaux. Les dispositions qu'on a prises dans la fixation des heures de chargement et de déchargement des fours ont

amené une régularité complète dans la quantité moyenne de chaleur appliquée à la formation de la vapeur.

Les 7,881,600 calories qui représentent la chaleur dégagée en vingt-quatre heures par les produits de la carbonisation de $3^{m.c}$,00 de houille équivalent à 985 kil. environ de bonne houille, ou à une consommation de 41 kilog. par heure, ce qui équivaut à 4^{k},1 par force de cheval et par heure (1).

Des essais directs faits à Seraing sur un four à coke ont prouvé que la chaleur perdue permettait de vaporiser en moyenne 146 kil. d'eau par heure sous une tension moyenne exprimée en atmosphère par le nombre 2,76.

Les gaz qui s'échappent de l'enceinte où s'opère la carbonisation renferment un excès de principes combustibles; de plus, ils sont très-fortement échauffés. Il est donc facile de les enflammer et de les brûler complétement par leur mélange avec de l'air en quantité convenable, mais sans excès à leur sortie de cette enceinte. Dans les foyers ordinaires des chaudières à vapeur, la quantité d'air introduite à travers la grille est au contraire le double et quelquefois le triple de celle qui est nécessaire pour brûler le combustible, puisque les gaz renferment souvent deux fois plus d'oxygène que d'acide carbonique, ainsi que M. Combes l'a constaté par de nombreuses expériences (2).

---

(1) Nous avons calculé la chaleur perdue totale d'après la loi de Welter, bien que les chaleurs de combustion de l'hydrogène, de l'hydrogène carboné, de l'oxyde de carbone soient en réalité plus grandes que celles données par cette loi, en partant de celle du carbone comme base. Mais il est à remarquer que la production, par distillation de la houille, de tous ces composés gazeux, a exigé l'emploi d'une certaine quantité de chaleur passée à l'état latent et qui a été restituée seulement pendant la combustion. Il y a donc une compensation à établir et tout porte à croire que la loi de Welter est suffisamment approchée pour la pratique toutes les fois que l'on aura à comparer des combustibles dans le même état physique, comme le charbon, la houille, les lignites. Elle devient, au contraire, tout à fait inexacte quand on compare des combustibles qui sont les uns à l'état solide, les autres à l'état gazeux.

(2) Sur les moyens de brûler la fumée. (*Annales des Mines*, t. XI, 4e série.)

Ce grand excès d'air doit évidemment occasionner une perte considérable sur l'effet utile du combustible, puisqu'il s'échappe par la cheminée à une température encore assez élevée. Il y aurait peut-être un avantage économique à brûler la houille dans une enceinte portée à une haute température, qui transmettrait les produits de la combustion par une série d'ouvertures dans les carneaux de la chaudière à vapeur, au lieu des foyers ordinaires où une grande partie de la chaleur développée se disperse par le rayonnement. L'enceinte et la voûte une fois échauffées, la totalité de la chaleur dégagée par la combustion serait entraînée par les gaz, qui pourraient ne renfermer que peu ou point d'oxygène libre. L'effet utile considérable qu'on retire des flammes perdues des fours à coke donne lieu de penser qu'on obtiendrait un bon résultat de cette innovation, qui permettrait, en outre, de diminuer et même de supprimer la production de la fumée.

Je terminerai ce qui concerne la fabrication du coke dans les fours en faisant remarquer les différences que présente le procédé de la carbonisation de la houille avec ceux de la carbonisation du bois en meules. Dans l'un et dans l'autre cas, la carbonisation s'opère au moment de l'introduction d'une quantité d'air limitée au milieu du combustible à carboniser. Dans les fours à coke, les produits de la distillation se brûlent en très-grande partie par l'oxygène atmosphérique et développent ainsi la chaleur nécessaire pour effectuer la carbonisation. Quand on carbonise, au contraire, le bois dans des meules, c'est le charbon déjà formé qui brûle; les produits de la distillation du bois se dégagent, sinon en totalité, du moins en très-grande partie, sans altération (p. 123). On peut facilement assigner la cause de ces différences. Le coke est en effet moins combustible que les carbures d'hydrogène qui composent les produits de la distillation de la houille. Les produits de la distillation du bois, très-chargés d'eau et d'acide carbonique, sont au

contraire moins faciles à brûler que le charbon. Le charbon brûle dans l'air quand la température s'élève à 230 ou 240 degrés. Les produits de la distillation exigent une température presque rouge pour se combiner avec l'oxygène. Ces différences de combustibilité me paraissent de nature à expliquer les faits observés.

Résumé.

On peut déduire des faits consignés dans ce Mémoire les conclusions suivantes :

1°. Les gaz qui se dégagent des fours à coke renferment une proportion de principes combustibles qui va constamment en diminuant du commencement à la fin de la carbonisation.

2°. Plus des deux tiers de l'hydrogène contenu dans la houille sont brûlés pendant la carbonisation. Il se brûle en même temps une quantité de carbone égale à celle que renferment les produits volatils de la distillation de la houille en vases clos. Les deux cinquièmes environ de l'oxygène atmosphérique introduit dans le four à coke sont transformés en eau; le reste entre en combinaison avec le carbone.

3°. Les produits gazeux des fours à coke renferment une grande quantité de chaleur utilisable, dont les deux tiers en moyenne sont à l'état sensible. Il est donc nécessaire d'utiliser cette chaleur aussi près que possible des fours. Les gaz des fours à coke ne renfermant que peu de principes combustibles, ne sont inflammables par un excès d'air que quand ils ont été préalablement portés à une haute température. On ne pourrait donc pas les conduire au loin pour les brûler, ainsi que cela se pratique pour les gaz qui s'échappent d'autres foyers métallurgiques.

4°. La chaleur nécessaire à la carbonisation de la houille dans les fours est fournie simultanément par la combustion d'une partie des produits de la distillation, et par celle d'une proportion très-notable du charbon qu'elle laisse

comme résidu. Tous les perfectionnements à porter ultérieurement dans la fabrication du coke doivent tendre à diminuer autant que possible cette consommation de charbon. Il faut arriver à produire dans les fours à peu près autant de coke que la houille en donne en vases clos. La grande quantité de chaleur que renferment encore les produits gazeux qui se dégagent des fours donne lieu de penser qu'on arriverait, sans trop de difficulté, à ce résultat.

DEUXIÈME DIVISION.

MÉTALLURGIE DU FER.

I.

Sur la chaleur de combustion du carbone et de l'oxyde de carbone.

Dans la séance de l'Académie des Sciences du 11 mai 1840, M. Hess, en lui communiquant quelques résultats calorifiques obtenus dans certaines combinaisons chimiques, fait remarquer que les lois qu'il en déduit s'appliquent aux recherches de M. Dulong, en ce qui concerne la combustion de carbone, et que, dans cette combustion, la quantité de chaleur dégagée par le premier atome d'oxygène est à la quantité dégagée par le second :: 3 : 2. Si donc on admet, avec M. Hess, que la quantité de chaleur dégagée dans une combinaison est constante, soit que la combinaison s'opère directement, soit qu'elle ait lieu indirectement et à différentes reprises, on devra en conclure que l'acide carbonique doit dégager de la chaleur en se transformant en oxyde de carbone, puisque deux atomes d'oxygène employés à produire de l'oxyde de carbone dégagent 6 de chaleur, tandis qu'ils ne dégageraient que s'ils étaient employés à produire de l'acide carbonique.

Les conséquences présentées par M. Hess étant fort importantes pour l'explication des phénomènes qui se passent dans les hauts fourneaux, j'ai voulu vérifier les calculs qui leur servent de base, et j'ai reconnu qu'il y a eu erreur dans la manière dont ils avaient été faits, e

les résultats à en déduire étaient directement opposés à ceux énoncés.

En prenant la moyenne des quatre expériences faites par Dulong sur la combustion du charbon, on trouve que 1 litre de vapeur de carbone donne par sa combustion complète 7,858 unités de chaleur.

En comparant ce nombre avec celui obtenu par M. Despretz (7,815 unités pour 1 en poids de charbon), on voit évidemment que M. Dulong a admis que l'acide carbonique renfermait $\frac{1}{2}$ volume de vapeur de carbone et 1 volume d'oxygène condensés en un seul volume, puisque, dans cette supposition, 1 litre de vapeur de carbone pèserait 1^{gr},018.

Ainsi donc, 1 litre vapeur carbone produit, par sa combustion, 2 litres d'acide carbonique et dégage 7,858 unités de chaleur.

Or, 2 litres d'oxyde de carbone, renfermant 1 litre vapeur carbone, consomment 1 litre oxygène et donnent en brûlant 2 volumes acide carbonique et 6,260 unités de chaleur.

La quantité de chaleur dégagée par la transformation de 1 litre vapeur de carbone en oxyde de carbone, a donc été seulement de 1,598 unités, ou les 0,216 de la quantité totale de chaleur dégagée par la combustion complète du charbon. La quantité de chaleur dégagée par la combinaison du premier atome d'oxygène est à celle dégagée par la combinaison du deuxième :: 0,27 : 1, ou approximativement :: 1 : 4.

Il est facile de conclure de ces nombres l'abaissement de température que doit éprouver l'acide carbonique supposé pur, en se transformant en oxyde de carbone. En effet :

1 litre d'acide carbonique contient $\frac{1}{2}$ litre de vapeur de carbone dont la combustion complète a donné 3,929 unités de chaleur.

1 litre d'acide carbonique dissout $\frac{1}{2}$ litre vapeur de car-

bone, et donne 2 litres d'oxyde de carbone, dont la combustion donnera 6,260 unités.

Il y a donc eu 10,189 unités de chaleur dégagées. Or, comme il n'y a eu en tout que 1 litre de vapeur de carbone brûlé, sa combustion ne doit donner que 7,858 unités de chaleur. La différence 2,331 représente donc la quantité de chaleur absorbée et rendue latente par 1 litre d'acide carbonique, en se transformant en 2 litres d'oxyde de carbone.

Les 2 litres d'oxyde de carbone formé pèsent $2^{gr},514$. La chaleur spécifique de ce gaz étant 0,2884, d'après de Laroche et Bérard, on trouve que 2 litres dégagent, en se refroidissant de 1 degré, une quantité de chaleur représentée par $2,514 \times 0,2884 = 0,727$. L'abaissement de température qui doit résulter de l'absorption de 2,331 unités de chaleur rendue latente, sera donc $\frac{2331}{0,727} = 3,206$ degrés.

Ces calculs supposent que la quantité de chaleur dégagée par la combinaison est la même, soit que cette combinaison s'opère directement, soit qu'elle ait lieu à différentes reprises.

Cette loi, qui a été annoncée par M. Hess, paraît, du reste, conforme à toutes les analogies.

L'erreur dans laquelle est tombé M. Hess provient de ce qu'il a admis dans l'acide carbonique un volume de vapeur de carbone et un volume d'oxygène condensés en un seul, ce qui donne à la vapeur de carbone une densité deux fois plus faible que celle adoptée par M. Dulong.

II.

Notice sur des expériences relatives à l'emploi du bois en nature dans les hauts fourneaux.

Les expériences dont je rapporte le détail dans cette Notice ont eu pour but d'éclaircir quelques questions

relatives à l'emploi du bois vert ou desséché dans les hauts fourneaux. Je les ai entreprises au mois de décembre 1837, dans le haut fourneau de Vellexon que fait valoir M. Gauthier. J'ai cherché à apprécier quelle était la succession des altérations qu'éprouvent les minerais et le combustible employé en nature, en descendant avec les charges, et quelle influence la substitution du bois au charbon avait sur la marche et la température du haut fourneau.

Avant de décrire les résultats de ces essais, je donnerai quelques renseignements sur les dimensions et le roulement du haut fourneau depuis l'emploi du bois en nature.

La cuve du fourneau présente une forme particulière qui a été adoptée pour prévenir les chutes de mine; elle se compose de deux parties cylindriques et de deux parties coniques. L'ouvrage a la forme d'un cône renversé dont la grande base se raccorde avec le cercle inférieur des étalages. Les dimensions du fourneau sont les suivantes :

	Mètres.
Diamètre du gueulard	0,60
Hauteur du premier cylindre	1,33
Hauteur du premier tronc de cône	3,34
Diamètre du deuxième cylindre	1,33
Hauteur du deuxième cylindre	1,33
Hauteur du deuxième tronc du cône	1,67
Hauteur totale de la cuve	7,67
Diamètre au ventre	2,27
Hauteur des étalages	1,67
Diamètre supérieur de l'ouvrage	0,83
Hauteur de l'ouvrage	0,83
Largeur devant la tuyère	0,54
Hauteur du creuset	0,49
Hauteur totale du fourneau	10,66
Inclinaison des étalages	66 degrés.

D'après ces mesures, on peut calculer les capacités des dif-

férentes parties du fourneau, à partir du gueulard, ainsi qu'il suit :

	Mètres cubes.
Partie cylindrique supérieure.....	0,375
Première partie conique.....	2,540
Deuxième partie cylindrique	1,830
Deuxième partie conique.....	4,290
Capacité totale de la cuve.....	9,035
Capacité des étalages.....	3,370
Capacité de l'ouvrage.....	0,310
Capacité du fourneau jusqu'à la tuyère..	12,715

Si la cuve ne formait qu'un seul tronc de cône depuis le grand ventre jusqu'au gueulard, sa capacité serait de $13^{m.c}$,81, et par conséquent supérieure de $4^{m.c}$,78, ou moitié environ, à son volume actuel.

Le fourneau marche au vent chaud depuis le mois de mai 1837, époque à laquelle on a commencé à introduire du bois dans les charges. L'appareil pour le chauffage de l'air est des plus simples. Il se compose de deux gros tuyaux en fonte de 0^{m},30 de diamètre, parallèles et placés à l'extérieur du four dans une position horizontale, qui se trouvent réunis par quatre tuyaux horizontaux de 0^{m},20 de diamètre et de 4^{m},50 de longueur. Un des gros tuyaux extérieurs est séparé en deux parties égales par un diaphragme. Un des compartiments reçoit l'air froid qui traverse le four à deux reprises, et revient dans le second compartiment d'où part la conduite d'air chaud. Cet appareil présente cet avantage, que toutes les jointures sont à l'extérieur, circonstance qui rend les réparations rares et faciles. L'air peut s'y échauffer avec facilité jusqu'à 300 degrés, et même il est rare qu'on laisse entrer dans le four toute la flamme qui s'échappe du haut fourneau. Un registre, placé dans la cheminée qui surmonte le gueulard, sert à régler l'introduction du gaz dans le four à air chaud.

Le volume du vent lancé par la machine soufflante, ramené à zéro et à la pression de $0^m,76$, est de 20 mètres cubes par minute. L'orifice de la buse a $0^m,061$ de diamètre.

On consomme exclusivement dans le fourneau des minerais en grains de première qualité, qui donnent des fontes destinées à l'affinage.

Au mois de décembre 1837, un mois après la mise en feu, la charge se composait de (1) :

	Volume. Mètres cubes.	Poids. Kilogrammes.
3 rasses de bois vert.....	0,250	108
2 rasses de bois desséché.....	0,167	55
2 rasses de charbon.....	0,167	36
7 conges $\frac{1}{4}$ de mines en grains mélangées.	0,151	272
1 conge $\frac{1}{2}$ de castine.....	0,031	38
Volume total de la charge.....	0,766	

Le fourneau, dont la capacité est de $12^{m.c},715$, contient vingt-sept charges : d'où il suit que le volume occupé moyennement par chacune d'elles est de $0^{m.c},47$.

Le bois employé renferme au moins les 0,75 d'essences dures, chêne, charme et hêtre. Il est découpé par la scie circulaire en morceaux de 5 à 6 pouces de longueur. J'ai trouvé 215 kilogrammes pour le poids du cuveau de bois vert scié.

Le bois desséché et légérement bruni que l'on retire des séchoirs établis par M. Gauthier, pèse, après le sciage, 165 kilogrammes le cuveau, ou 330 kilogrammes le mètre cube.

---

(1) Les mesures employées dans l'usine sont :

Pour le combustible..... le cuveau $= 0^{m.c},50 =$ 6 rasses.
Pour les minerais et la castine... le cuveau $= 0^{m.c},25 =$ 12 conges.

La corde charbonnière de $3^{stères},33$ donne au sciage :

Bois vert..... $3^{m.c},13$;
Bois desséché..... $2^{m.c},75$.

Le mélange de minerai en grains employé pèse 1,800 kilogrammes le mètre cube. On commence par charger le bois vert, ensuite le bois desséché, le charbon, la castine et les minerais. On passait alors vingt-deux charges en seize heures, intervalle de deux coulées, et l'on obtenait par coulée 1,650 kilogrammes de fonte noire destinée à l'affinage, ce qui porte le produit de la charge à 75 kilogrammes, et le rendement des minerais à 27,2 pour 100.

Le travail du fondeur n'offrait aucune difficulté. Les laitiers étaient bien fluides; après leur refroidissement, ils étaient vitreux, transparents et légèrement violacés dans les éclats minces.

Telles étaient les conditions de roulement du haut fourneau à l'époque où j'entrepris, de concert avec M. Vigoureux, neveu de M. Gauthier, les expériences que je rapporte ci-après.

Pour constater la suite des altérations qu'éprouve le bois en descendant dans le fourneau, nous avions commencé par suspendre, au bout de fils de fer n° 20, des morceaux de bois de diverses grosseurs, solidement maintenus par des armures en fer feuillard. Une seule expérience faite de cette manière a pu réussir.

La forte contraction qu'éprouve le bois en se carbonisant rendait les précautions que nous avions prises pour le maintenir tout à fait inutiles lorsqu'il s'agissait de le retirer.

Nous avons fait alors construire en grosse tôle deux appareils en forme de cloche dont le fond était un disque maintenu par deux clavettes. La surface entière de la cloche et du disque était percée de petits trous destinés à mettre les matières renfermées dans l'intérieur de l'appareil en communication avec le courant extérieur. Les capacités de ces deux cloches étaient d'environ 1 litre et $0^{lit},70$. Un trou ménagé à leur partie supérieure permettait de les fixer à l'extrémité du fil de fer. Pour les retirer du fourneau, on

faisait passer le fil d'attache sur la gorge d'une poulie en fer dont l'axe était établi à l'extrémité d'un ringard en forme de fourche qu'on maintenait solidement sur le gueulard. Il fallait au moins quatre hommes pour retirer l'appareil d'une profondeur de $4^m,85$.

Les produits de ces expériences ont été soigneusement garantis du contact de l'air jusqu'au moment où ils ont été essayés au laboratoire de Vesoul.

Les mêmes fils de fer pouvaient difficilement servir à plus de deux opérations. Le contact des gaz carbonés qui traversent le fourneau leur fait éprouver une espèce de cémentation. Leur nerf disparaît complétement, et il n'est plus possible de les recourber sur eux-mêmes sans les briser.

Expérience N° 1.

Un morceau de chêne de $0^m,07$ de diamètre sur $0^m,20$ de longueur, placé au bout d'un fil de $8^m,10$ de long et maintenu au moyen d'une armure de cercles en fer, fut descendu dans le fourneau sous la charge. On mesurait de temps en temps la longueur du fil excédant pour savoir à quelle profondeur le bois se trouvait dans le haut fourneau. Voici le résumé de ces observations :

HEURE à laquelle l'observation a été faite.	HAUTEUR de l'appareil dans le fourneau à partir du gueulard.	TEMPS du séjour dans le fourneau.	OBSERVATIONS.
h m 12.35	mètres 2,27	h m 0. 0	On place le morceau de bois sous la charge.
1.30	3,71	0.55	On charge.
2.25	4,70	1.50	On charge.
2.45	4,85	2.10	On retire l'appareil.

Le fil de fer était rouge, mais seulement à partir de

$4^m,55$ du gueulard. Le morceau de chêne, au moment où il a été retiré, dégageait beaucoup de fumée; une partie assez considérable du morceau était enlevée; toute la surface paraissait complétement carbonisée; le centre, au contraire, était à peine bruni; le bois présentait une multitude de fissures, dirigées de la circonférence au centre, et s'élargissant à mesure qu'on s'approchait de la surface.

Essai des produits. — J'ai essayé séparément le centre du morceau et le charbon qui s'était formé à sa surface; j'ai trouvé pour la composition moyenne de celui-ci :

Matières volatiles.....	0,30
Charbon.....	0,68
Cendres.....	0,02
	1,00

Deux essais faits à la litharge sur 1 gramme de charbon réduit en poussière ont donné pour moyenne :

Plomb..... ..... $26^{gr},30$.

Les 0,30 de matières volatiles équivalent à 0,093 de carbone.

Une rondelle de la partie centrale pesant $7^{gr},43$, dont on avait séparé toute la matière déjà carbonisée, a donné la composition suivante, par calcination brusque au creuset de platine :

Matières volatiles.....	0,747
Charbon.....	0,245
Cendres.....	0,008
	1,000

Moyenne de deux essais faits chacun sur 1 gramme de sciure mêlée à 25 grammes de litharge, $16^{gr},50$.

Les 0,747 de matières volatiles équivalent donc à 0,21 de carbone.

Expérience N° 2.

On a placé dans une des cloches en tôle un morceau de chêne vert de $0^m,05$ de diamètre avec des minerais en

grains mélangés. La cloche jetée sous la charge a été retirée après $1^h\ 15^m$ de séjour dans le haut fourneau; elle se trouvait alors à $3^m,90$ de profondeur au-dessous du gueulard.

Le bois que renfermait la cloche n'était nullement altéré; seulement il paraissait avoir éprouvé un commencement de dessiccation sur $0^m,0033$ d'épaisseur au plus, à partir de sa surface.

Essai du bois. — J'ai essayé séparément avec la litharge la sciure du centre du morceau et celle provenant de la surface jusqu'à $0^m,0033$ de profondeur.

La sciure du centre du morceau a donné pour moyenne de deux essais, plomb $13^{gr},20$; la sciure de la zone extérieure a donné, plomb $14^{gr},25$.

Par calcination brusque opérée sur une rondelle de $10^{gr},92$ j'ai obtenu pour la composition moyenne du bois :

Matières volatiles.....	0,856
Charbon et cendres....	0,144
	1,000

Essai des minerais. — Les minerais n'avaient éprouvé aucun changement; leur poussière était, comme auparavant, d'un jaune brunâtre, et nullement attirable au barreau aimanté.

Expérience N° 3.

Un mélange de divers minerais a été placé dans une des cloches avec un morceau de chêne vert et un morceau de charme desséché. L'appareil a été jeté dans le fourneau sous la charge; à $3^h\ 30^m$ il avait atteint une profondeur de $2^m,27$ au-dessous du gueulard. Après $2^h\ 30^m$ il était à 5 mètres. Au reste, le tableau suivant indique sa hauteur dans le fourneau aux différentes époques que nous avons notées :

HEURE à laquelle l'observation a été faite.	HAUTEUR de l'appareil dans le fourneau à partir du gueulard.	TEMPS du séjour dans le fourneau.	OBSERVATIONS.
h m	mètres	h m	
3.30	2,27	0. 0	On charge sur l'appareil.
4.35	3,88	1. 5	On charge.
5.15	4,70	1.45	On charge.
5.55	5,00	2.25	On retire la cloche au moment de la charge.

La cloche était rouge-cerise au moment où elle a été retirée; elle a été placée dans un étouffoir jusqu'après son entier refroidissement, puis les minerais et les charbons ont été enfermés séparément dans des vases bien bouchés.

Les bois paraissent complétement carbonisés; le charbon de chêne vert est traversé par de nombreuses fissures, et présente très-peu de consistance. Le charbon provenant du charme desséché est beaucoup plus compacte.

Essai des charbons. — L'analyse de ces deux sortes de charbon a été faite par calcination rapide au creuset de platine; on a obtenu :

	Charbon de chêne vert.	Charbon de charme desséché.
Matières volatiles....	0,062	0,060
Charbon.....	0,918	0,912
Cendres.....	0,020	0,028
	1,000	1,000

Ces charbons sont donc déjà plus fortement calcinés que le charbon de forêt, qui renferme moyennement 10 pour 100 de substances volatiles.

Essai des minerais. — Les minerais étaient recouverts d'une pellicule très-mince de charbon métalloïde. Leur poussière est d'un gris noirâtre et complétement attirable

au barreau aimanté; l'acide chlorhydrique les dissout sans dégagement d'hydrogène, et la liqueur précipite en brun-noir par les alcalis. J'ai constaté que le calcaire mêlé avec ces minerais n'avait subi aucune décomposition. L'analyse a donné pour la composition de ces minerais :

		Oxygène
Perte au feu (eau et matières charbonneuses)..	0,040	»
Argile (résidu insoluble dans l'acide chlorhydrique et la potasse).....	0,254	»
Silice gélatineuse.....	0,040	»
Alumine soluble.....	0,070	»
Oxyde de chrome.....	trace.	»
Oxyde rouge de manganèse.....	0,022	»
Peroxyde de fer (*).....	0,350	0,119
Protoxyde de fer.....	0,140	0,032
Carbonate de chaux..... .	0,025	
	0,979	

Le rapport des quantités d'oxygène du protoxyde et du peroxyde de fer n'est pas tout à fait celui qui constitue l'oxyde magnétique Fe^2O^3, FeO. Je ferai remarquer que le minerai renferme une certaine quantité d'oxyde de manganèse qui n'était probablement pas encore transformé en protoxyde, et dont l'excédant d'oxygène aura pu faire passer une partie du protoxyde de fer à l'état de peroxyde, dans l'attaque par l'acide chlorhydrique.

(*) J'ai recherché la proportion relative de peroxyde et de protoxyde de fer au moyen de l'acide sulfureux liquide. On traite 1 gramme de minerai par l'acide chlorhydrique concentré et pur. Quand le résidu est décoloré, on ajoute à la liqueur une dissolution bien claire d'acide sulfureux mélangée de chlorure de barium. La liqueur se trouble presque instantanément. On fait bouillir; au bout de quelques minutes, la liqueur est complétement décolorée. Quand tout l'excès d'acide sulfureux est chassé, on ajoute à la dissolution un excès de chlorure de barium et l'on filtre; tout le sulfate de baryte correspondant au peroxyde de fer est sur le filtre avec le résidu insoluble dans l'acide chlorhydrique. Un atome de peroxyde de fer Fe^2O^3 = 1000,0 donne 1 atome de sulfate de baryte SO^3BaO = 1450,00. 100 de sulfate de baryte correspondent à 67 de peroxyde de fer.

Expérience N° 4.

On a placé un morceau de charme desséché, un morceau de chêne vert, des mines en grains de la fontaine Godard (1), avec un fragment de castine, dans une cloche au bout d'un fil de $9^m,75$ de longueur. Le tableau suivant indique la hauteur de l'appareil dans le fourneau aux différentes époques.

HEURE de l'observation.	HAUTEUR de l'appareil dans le fourneau à partir du gueulard.	TEMPS du séjour dans le fourneau.	OBSERVATIONS.
h m	mètres	h m	
11.15	2,27	0. 0	L'appareil est placé sous la charge.
12.20	3,88	1. 5	On charge.
1.10	4,85	1.55	On charge.
1.50	"	2.35	On charge.
2.15	5,35	3	On retire l'appareil.

La cloche et une certaine longueur du fil étaient rouges; le morceau de castine n'avait pas sensiblement perdu d'acide carbonique.

Essai des charbons. — Les bois étaient complétement carbonisés; le charbon de chêne vert était très-fissuré et fort peu cohérent. Essayés par calcination au creuset de platine, les charbons n'ont perdu que 5 pour 100 de leur poids de matières volatiles combustibles.

Les grains de minerai étaient tous recouverts, comme

(1) Ce minerai, dont la richesse atteint 49 pour 100 de fer, n'entre dans le lit de fusion que pour une conge et demie ou un cinquième environ. Il renferme beaucoup d'hydrate d'alumine qui le rend assez réfractaire, et qui empêche qu'on ne l'emploie en plus forte proportion.

dans l'expérience précédente, d'un enduit de charbon métalloïde. Leur poussière est d'un brun noir, et complétement attirable au barreau aimanté. Les acides la dissolvent presque en totalité, sans qu'il y ait dégagement de gaz.

L'analyse a donné pour la composition de ce minerai :

		Oxygène.
Argile (insoluble dans l'acide chlorhydrique et la potasse).....	0,030	»
Silice gélatineuse.....	0,040	»
Alumine soluble.....	0,070	»
Oxyde de manganèse.....	0,018	»
Peroxyde de fer.....	0,590	0,181
Protoxyde de fer.....	0,250	0,057
	0,998	

Le fer paraît être en totalité dans ce minerai à l'état d'oxyde magnétique.

Expérience N° 5.

On a placé dans une des cloches un morceau de chêne vert de $0^m,054$ de diamètre et de $0^m,162$ de longueur; on a jeté la cloche sous la charge dans le fourneau.

HEURE à laquelle l'observation a été faite.	DISTANCE de l'appareil dans le fourneau à partir du gueulard.	TEMPS du séjour dans le fourneau.	OBSERVATIONS.
h m	mètres	h m	
2.30	1,95	0. 0	On place l'appareil sous la charge.
3.10	3,42	0 40	On charge.
4.	4,22	1.30	On charge.
4.35	4,70	2. 5	On retire la cloche.

La cloche était chauffée jusqu'au rouge sombre au moment où elle a été retirée du fourneau.

Le bois présentait dans sa section trois couches distinctes :

le sommet du morceau, qui était taillé en pointe, et une zone de $0^m,0033$ d'épaisseur tout à l'entour, étaient d'un charbon très-friable et d'un noir intense. Sous cette zone, on en observait une autre de $0^m,0033$ d'épaisseur, analogue au bois bruni par une forte dessiccation. Enfin tout le reste du morceau, sur $0^m,0406$ de diamètre, ne paraissait avoir éprouvé aucun changement dans sa couleur et sa nature. Le bois présentait à sa surface de nombreuses fissures qui se prolongeaient jusqu'au bois non altéré.

Essai des produits. — Les trois parties distinctes du bois soumises à l'essai ont donné les résultats suivants :

	1. Partie extérieure.	2. Zone moyenne.	3. Partie centrale.
Matières volatiles.....	0,310	0,732	0,850
Cendres et charbon...	0,690	0,268	0,150
Plomb avec la litharge.	26 grammes.		

Une rondelle du centre dont on avait séparé la partie charbonneuse et la partie brunie, ayant été desséchée jusqu'à ce qu'elle commençât à brunir, a perdu les 0,19 de son poids.

Expérience N° 6.

Un morceau de chêne bruni par la dessiccation dans les séchoirs a été introduit dans une des cloches, et placé dans la charge entre le bois desséché et le charbon.

HEURE à laquelle l'observation a été faite	DISTANCE de l'appareil à partir du gueulard.	TEMPS du séjour dans le fourneau.	OBSERVATIONS.
h m 3.10	mètres 1,30	h m 0. 0	On place l'appareil entre le bois et le charbon. On charge à 4 heures.
4.40	3,71	1.30	On charge.
5.25	4,54	2.15	On retire l'appareil.

Essai du bois. — Le bois provenant de cette expérience paraît à peine altéré. Il est facile de voir que le bois a été bien moins échauffé dans cette expérience que dans la précédente, bien qu'il soit resté 10 minutes de plus dans le fourneau; à la profondeur à laquelle il se trouvait, il ne paraît pas avoir éprouvé un commencement de distillation. Cet effet tient sans doute à ce que la cloche était placée dans cette expérience au-dessus du bois, tandis que dans la précédente elle avait été placée sous la charge.

Expérience N° 7.

Deux morceaux de bois desséché ont été placés dans une des cloches sous la charge, et retirés après $2^h\ 30^m$ de séjour dans le fourneau. L'appareil était alors à $5^m,00$ au-dessous du gueulard. La cloche était rouge, le charbon obtenu était assez compacte et moins fissuré que celui provenant du bois vert; essayé par calcination au creuset de platine, il a donné comme composition moyenne :

Matières volatiles.....	0,07
Charbon...	0,91
Cendres.....	0,02
	1,00

Expérience N° 8.

Cette expérience avait pour but de constater si le calcaire employé comme castine avait la faculté d'absorber l'acide acétique que produit la distillation du bois dans l'intérieur du fourneau.

La castine concassée en gros fragments fut placée avec un morceau de chêne vert dans une des cloches, et jetée dans le fourneau au milieu d'une charge, entre le bois desséché et le charbon. Elle a été retirée après $1^h\ 30^m$ de séjour dans le fourneau. Le bois n'avait éprouvé aucun changement; seulement sa surface était recouverte d'une petite quantité de goudron; le calcaire était bruni à sa

surface. Traité par l'eau, il a donné une liqueur neutre, d'une couleur légèrement ambrée, qui précipitait assez abondamment par l'oxalate d'ammoniaque.

100 parties de calcaire renfermaient 1,6 d'acétate de chaux.

Conclusions.

Les résultats des expériences que je viens de rapporter, rapprochés les uns des autres, me paraissent devoir conduire aux conclusions suivantes :

1°. Dans toute la partie supérieure de la cuve, jusqu'à une profondeur de $4^m,22$ à $4^m,54$ au-dessous du gueulard, et après $1^h\ 30^m$ de séjour dans le fourneau, le bois n'éprouve pas d'altération sensible; le bois vert ne perd qu'une faible portion de l'eau hygrométrique qu'il renferme (n°s 2 et 8); les minerais ne perdent aucune partie de leur eau et de leur oxygène (n° 2); la castine seule absorbe une petite quantité d'acide acétique (n° 8).

2°. La distillation du bois commence à s'opérer à la profondeur de $4^m,22$ à $4^m,54$. Elle s'effectue de telle sorte que la surface des morceaux d'un certain volume est déjà carbonisée, lorsque tout leur intérieur se trouve encore à l'état naturel (n°s 1 et 5). Ce mode de distillation produit des charbons d'une faible cohésion. A la surface de chaque morceau de bois un peu volumineux, il s'opère un retrait considérable avant que le centre commence à l'éprouver, d'où résultent de nombreuses fissures qui se propagent de la circonférence au centre suivant des plans passant par l'axe ou perpendiculaires à celui-ci.

3°. A la profondeur de $5^m,19$ à $5^m,61$ au-dessous du gueulard, et après $2^h\ 30^m$ ou 3 heures de séjour dans le haut fourneau, la distillation du bois est complète, et le charbon ne retient plus qu'une faible proportion de substances volatiles (n°s 3, 4, 7). A $5^m,61$ de profondeur, la température du fourneau est le rouge-cerise, tandis qu'à

$1^m,00$ au-dessus elle est insuffisante pour commencer la distillation du bois : celle-ci s'opère donc entièrement, d'une manière complète, dans une zone du haut fourneau dont la hauteur est d'environ $1^m,00$, et dans un temps assez court qui dépend du volume des morceaux, mais qui ne dépasse pas $1^h\ 30^m$. Elle ne s'effectue à la fois que sur deux charges, de telle manière que le bois placé à la base de la charge inférieure est tout à fait carbonisé, lorsque le bois desséché qui se trouve au milieu de la seconde n'éprouve pas encore d'altération notable (nos 4, 5, 6) (1). La carbonisation du bois employé en nature dans le haut fourneau détermine donc un abaissement de température considérable qui s'opère brusquement dans un espace très-rétréci, abaissement de température dû sans doute à la chaleur latente absorbée par les gaz et par les vapeurs qui proviennent de cette distillation. Cette absorption de chaleur prouve que ces matières combustibles ne sont pas brûlées par le courant d'air en partie désoxygéné qui traverse le fourneau; car, s'il en était autrement, il est évident que la température de cet air s'élèverait au lieu de s'abaisser aussi rapidement.

4°. A la profondeur à laquelle le bois est complétement carbonisé, les minerais sont transformés seulement en oxyde de fer magnétique Fe^2O^3, FeO. Ils n'ont donc perdu que les 0,11 de l'oxygène qu'ils doivent abandonner pour arriver à l'état de fer métallique.

---

(1) La zone où la carbonisation s'opère dépend de la hauteur de chaque fourneau et de la proportion de bois en nature qu'on y consomme. Elle descend d'autant plus bas au-dessous du gueulard que la proportion de bois consommé est plus grande par rapport à celle du charbon, et que la hauteur du fourneau est plus considérable. Ainsi dans le fourneau de la Romaine, dont la hauteur totale est de $11^m,33$, et où l'on a employé presque constamment 0,66 de bois pour 0,33 de charbon en volume, on a trouvé, à la mise hors, une trace noire de $0^m,33$ de hauteur, tout autour de la cuve, à $5^m,52$ au-dessous du gueulard. Si, comme cela est probable, cette trace provient de la condensation du goudron, il faut en conclure que la chaleur était très-faible dans toute la partie supérieure du fourneau.

5°. Si l'on compare le volume des charges avec le volume de la partie du fourneau qu'elles occupent, on trouvera qu'il n'y a pas contraction jusqu'à la profondeur de $4^m,55$ au-dessous du gueulard, hauteur à laquelle la carbonisation du bois commence à s'opérer.

L'expulsion de l'eau des minerais, de presque toute l'eau hygrométrique du bois, et la distillation complète de celui-ci s'opérant dans une même zone du fourneau, il me sera facile de rendre compte de l'abaissement de température de l'air lorsqu'il la traverse.

La charge se compose, ainsi que je l'ai déjà dit plus haut, de :

Bois vert.....	108^k
Bois desséché.....	55
Charbon.	36
Minerais mélangés.....	272
Castine.....	38

Comme l'on charge moyennement toutes les 45 minutes, la consommation par minute peut être évaluée ainsi qu'il suit :

	^{k}
Bois vert.....	2,40
Bois sec.....	1,22
Charbon...	0,80
Minerais mêlés..... ..	6,04
Castine.....	0,84

En supposant que le bois vert renferme 30 pour 100 d'eau hygrométrique, qu'il laisse 0,22 de charbon à la distillation, que le bois desséché laisse 0,30 de charbon, que les minerais perdent moyennement 16 pour 100 d'eau combinée, on pourra évaluer comme il suit la proportion des matières volatiles expulsées par minute, savoir :

	^{k}	
Eau hygrométrique du bois vert....	0,720	$1^k,686$
Eau combinée des minerais.....	0,966	
Produits de la distillation.....	2,006	

En supposant (ce qui est probablement un minimum, puisque l'eau abandonnée passe de l'état solide à l'état gazeux), que l'eau dégagée par le minerai de fer n'exige pour son évaporation qu'une quantité de chaleur latente équivalente à celle que prendrait un même poids d'eau liquide, et en adoptant le nombre 543 pour le calorique latent de la vapeur d'eau, on trouve que l'évaporation de $1^{kil},686$ d'eau absorbera : $1,686 \times 543 = 916$ unités de chaleur.

La chaleur latente moyenne des produits de la distillation du bois est probablement plus considérable que celle de la vapeur d'eau, puisqu'ils renferment une forte proportion de gaz permanents. Comme je ne connais aucune expérience qui ait eu pour but de déterminer la quantité de chaleur latente absorbée par la distillation complète du bois, je la supposerai égale à celle de la vapeur d'eau. Dans cette hypothèse, la quantité de chaleur absorbée et rendue latente, sera : $2^{kil},006 \times 543 = 1090$, laquelle, ajoutée aux 916 déjà trouvés, donne un total de 2,006 unités de chaleur.

D'autre part, la quantité d'air lancée par minute dans le fourneau étant de 20 mètres cubes, pesant 26 kilogrammes, si l'on prend 0,26 pour le coefficient du calorique spécifique des gaz qui traversent le fourneau, on trouvera que la quantité de chaleur qu'ils dégagent, lorsque leur température s'abaisse de 1 degré est de $26 \times 0,26 = 6,76$; la diminution de température qui résultera de l'absorption de 2,006 unités de chaleur rendue latente, sera par conséquent de $\frac{2006}{6,76} = 295$ degrés.

Si l'on supposait que la chaleur latente moyenne des produits de la distillation du bois est le double de celle de la vapeur d'eau, on trouverait que l'abaissement de température doit être de $\frac{3096}{6,76} = 458$ degrés.

En tout cas, les nombres qui viennent d'être calculés, et dont le premier est certainement un minimum, permettent

d'expliquer d'une manière satisfaisante les résultats de nos expériences, en ce qui concerne la variation brusque qu'éprouve la température du haut fourneau; et si l'on admet ce premier résultat, on en conclura nécessairement qu'aucune portion des produits volatiles de la distillation du bois n'est brûlée par le courant d'air déjà désoxygéné qui traverse le fourneau. Au reste, l'intensité et la couleur de la flamme qui se détache du gueulard lorsqu'on roule au bois, prouve qu'une grande partie, sinon la totalité, des produits de la distillation échappe à la combustion dans l'intérieur du fourneau.

Ce fait n'a rien qui puisse surprendre. En effet, si l'on compare la quantité de vent consommée par un fourneau marchant au charbon de bois avec la quantité de charbon qu'il brûle, on trouve dans presque tous les cas que la proportion d'oxygène lancée dans le fourneau, jointe à celle abandonnée par les minerais, est supérieure de beaucoup à celle que le charbon exigerait pour se transformer en acide carbonique. On observe cependant qu'il se dégage au gueulard de très-grandes quantités d'oxyde de carbone qui se forme dans le fourneau à une très-haute température, et qui y existe avec une forte proportion d'oxygène libre.

Toutefois il est constant que la distillation du bois laisse dans le fourneau, outre le charbon, certains produits fixes, dont l'effet réductif ou calorifique n'est pas sans importance.

D'une part, une grande partie du goudron se condense dans les parties supérieures du fourneau au contact des corps froids. La nouvelle distillation qu'il éprouve plus tard doit laisser pour résidu une proportion très-notable de charbon.

D'un autre côté, on a pu voir, d'après les expériences rapportées plus haut, que la distillation du bois, et particulièrement celle de la partie centrale des morceaux d'un certain volume, s'opérait dans un espace échauffé jusqu'au rouge. La température initiale des vapeurs produites est

très-inférieure à celle de l'atmosphère gazeuse à laquelle elles se mêlent. Elles doivent subir alors des modifications analogues à celles qu'éprouvent les produits de la distillation du bois, lorsqu'on les fait passer à travers un tube de porcelaine chauffé au rouge. Tous les co nposés ternaires se décomposent et se transforment en composés binaires, avec dépôt de charbon qui se forme de préférence sur les corps les plus échauffés. Telle est probablement l'origine de cette pellicule mince de charbon métalloïde qui recouvre chaque grain de minerai dans nos expériences (3) et (4) (*).

Il eût été très-intéressant de rechercher la proportion de charbon que laisse le bois en se distillant dans le fourneau. Malheureusement les charbons provenant de nos expériences étaient trop fracturés pour permettre de les doser avec exactitude. D'un autre côté, d'après les résultats de quelques essais de laboratoire que je rapporte ci-après, j'ai tout lieu de croire que la proportion de charbon laissée par chaque morceau de bois, de même espèce, dans le même état de dessiccation, calciné dans le même appareil, est variable avec son poids, et d'autant plus grande jusqu'à une certaine limite, que ce poids est plus considérable. Ces essais ont été faits par calcination rapide dans un creuset de platine enfermé dans un creuset de terre, avec toutes les précautions qu'on prend d'ordinaire pour empêcher l'accès de l'air. Quelques-unes des rondelles avaient été préalablement desséchées sur un bain de mercure. Le tableau suivant indique les résultats de ces expériences.

(*) Cette explication donne la clef de certains phénomènes métallurgiques assez remarquables qu'on a observés dans le roulement du fourneau de Vellexon, en juin 1837. A cette époque, la charge en combustible se composait de 3 rasses de charbon et 3 rasses de bois desséché. La chaleur s'étant portée au gueulard, on obtint pendant quelque temps des laitiers tellement surchargés de graphite, qu'on était obligé de les retirer avec des ringards hors du fourneau. Les minerais ne donnaient presque pas de produits. Il est bien probable que tout ce développement de graphite provenait de la distillation du bois qui s'était opérée dans un espace très-échauffé, et par conséquent dans les conditions les plus favorables pour la formation de ces écailles graphiteuses.

Nos d'ordre et essence.	Poids des rondelles.	Poids des rondelles après dessiccation.		Charbon obtenu par calcination brusque.			Nature du charbon et Observations.
		Poids absolu.	P. 100 du bois vert.	Poids.	Pour 100 du bois desséché.	Pour 100 du bois vert.	
1. Charme vert de 0m.035 de diamètre.	gr 3,18	"	"	0,43	"	13,52	Le charbon laissé par les rondelles minces est très-homogène et assez cohérent. Celui que donnent les rondelles de bois desséché est évidemment plus dense que celui provenant du bois vert. Pour les rondelles un peu épaisses, les fibres ligneuses sont infléchies jusqu'à une certaine distance de la surface. Elles tournent toutes leur concavité vers l'axe de la rondelle. Le bois présente alors une fissure concentrique à la circonférence de la rondelle.
	4,10	"	"	0,56	"	13,66	
	4,27	"	"	0,58	"	13,58	
	10,54	"	"	1,54	"	14,62	
	15,23	"	"	2,35	"	15,40	
	4,10	3,22	78,6	0,62	19,25	15,12	
	3,35	2,48	74,2	0,53	21,37	15,82	
	3,60	2,35	65,2	0,62	26,35	17,22	
2. Hêtre vert de 0m,038 de diamètre.	5,25	"	"	0,68	"	12,95	
	4,42	3,35	75,8	0,65	19,37	14,70	
	5,43	3,75	69,1	0,87	23,46	16,02	
3. Le hêtre (2) après trois mois de séjour au laboratoire	4,09	"	"	0,57	"	13,90	
	20,25	"	"	3,05	"	15,06	
	26,32	"	"	4,07	"	15,48	
4. Chêne de 0m,044 de diamètre.	4,40	"	"	0,63	"	14,30	
	22,20	"	"	3,52	"	15,86	
5. Chêne vert de 0m,06 de diamètre.	2,77	"	"	0,38	"	13,72	
	5,00	"	"	0,72	"	14,40	
	11,95	"	"	1,95	"	16,40	
	25,00	"	"	4,28	"	17,12	
	28,52	"	"	4,88	"	17,10	

J'ai fait également quelques essais analogues sur diverses rondelles de bois desséché. Les résultats en sont rapportés dans le tableau suivant.

NOS D'ORDRE.	ESSENCE et nature.	POIDS des rondelles.	CHARBON OBTENU par calcination brusque.		OBSERVATIONS.
			Poids.	Pour 100 du bois desséché.	
1	Chêne desséché très-brun de $0^{m},032$ de diamètre.	gr 3,90	0,92	23,50	Les rondelles minces donnent un charbon plus compacte, moins fissuré que les rondelles épaisses : dans celles-ci, les fentes qui se propagent de la circonférence au centre sont tapissées à l'intérieur de charbon graphiteux: ce qui prouve que leur température était de beaucoup supérieure à celle des parties centrales lorsque leur distillation s'opérait.
		11,10	2,81	25,30	
		23,46	6,56	28,00	
2	Charme très-brun de $0^{m},03$ de diamètre.	4,11	0,95	23,10	
		11,67	2,82	24,16	
		16,85	4,12	24,45	
		24,93	6,11	24,54	
3	Hêtre à peine brun par la dessiccation.	7,70	1,38	17,92	
		27,12	5,30	19,55	
4	Tremble d'un brun très-clair.	4,27	0,75	17,56	
		10,43	1,93	18,55	
		22,60	4,31	19,07	

Carbonisation rapide. — Ces nombres prouvent, 1° que la dessiccation du bois permet d'obtenir par calcination brusque une quantité de charbon rapportée au poids du bois vert, d'autant plus grande, que cette dessiccation a été poussée plus loin, résultat conforme à ceux des expé-

riences faites en grand par M. Sauvage; 2° que pour des poids différents du même bois calciné dans le même état de dessiccation, dans des vases de même nature et de même capacité, soumis à un foyer d'une température constamment la même, la proportion de charbon obtenue est d'autant plus grande, jusqu'à une certaine limite, que le poids du bois soumis à la distillation est plus considérable.

Ce dernier résultat peut se concevoir de la manière suivante : la conductibilité des vases qui renferment le combustible à distiller rend disponible à chaque instant, dans leur intérieur, une quantité de calorique déterminée. L'absorption de ce calorique rendu latent, par les produits de la distillation, maintient l'intérieur du vase à une température d'autant plus basse, que la masse du combustible qu'il renferme est plus grande. La distillation est un peu plus lente dans ce cas que dans l'autre; elle doit donc laisser un plus grand résidu de charbon.

1°. *Influence des essences.* — Dans les deux séries d'expériences que je viens de rapporter, on peut remarquer que le chêne est celui de tous les bois essayés, verts ou desséchés, qui donne les nombres les plus différents les uns des autres, relativement à la proportion de charbon laissée par distillation; la différence dans les produits s'élève à 3,5 pour 100 de charbon dans l'essai des bois verts, et à 4,5 pour 100 dans l'essai du bois desséché artificiellement; tandis que pour les autres essences, la différence de rendement ne dépasse pas 2 pour 100 pour les bois verts, et 1,5 pour 100 pour les bois desséchés. Il est assez difficile d'assigner la cause de cette divergence. Toutefois, si elle se reproduisait dans des expériences faites plus en grand, il serait évident que le bois de chêne serait préférable à toutes les autres essences pour être employé en nature dans les hauts fourneaux.

Quoi qu'il en soit, on voit qu'une très-petite différence dans la durée d'une carbonisation rapide suffit pour déter-

miner des variations très-notables dans la quotité de ses produits.

2°. *Influence de la grosseur des morceaux.* — Si l'on applique les résultats qui précèdent à ce qui se passe dans le haut fourneau, on trouvera que la proportion de charbon, produite par les morceaux de bois d'un faible volume, doit être sensiblement moins forte que celle laissée par la distillation des gros morceaux; mais que, d'un autre côté, le charbon que donnent les petits morceaux a plus de cohérence et de compacité.

3°. *Influence de la dessiccation.* — L'influence de la dessiccation préalable du bois, sur son rendement en charbon dans le fourneau, ne me paraît pas d'une grande importance. En effet, on a vu que les morceaux de bois vert, retirés du haut fourneau avant leur complète carbonisation (1) et (5), présentent entre la zone extérieure déjà charbonnée et celle où le bois a conservé sa teinte primitive, une zone de bois bruni tout à fait analogue à celui qu'on retire des séchoirs. Le bois se dessèche donc progressivement de la circonférence au centre, et la carbonisation suit la même marche. La faible épaisseur de la zone brunie prouve le peu de conductibilité de cette enveloppe. Son existence établit que le bois vert passe par l'état de bois desséché avant de se carboniser, et par conséquent que la proportion de charbon qu'il laisse est équivalente à celle que laisse ce dernier.

Toutefois, s'il paraît probable que le bois vert laisse autant de charbon que s'il avait été préalablement desséché, il est évident que sous ce dernier état il exigerait pour sa distillation une quantité de chaleur moindre, et par conséquent il ne refroidirait pas autant la partie supérieure du fourneau. D'un autre côté, le retrait qu'il aurait déjà subi dans les séchoirs rendrait moins sensible celui qu'il éprouve dans le fourneau, et qui est la cause de la faible cohésion des charbons qu'il produit.

Résumé.

En résumant, l'économie qui résulte de l'emploi du bois me paraît due en très-grande partie à la proportion de charbon que laisse ce combustible dans le fourneau. La carbonisation ordinaire ne donne moyennement que les 0,15 en poids de charbon bien calciné. Or, si l'on admet que le bois vert laisse seulement 0,22 de charbon calciné dans le haut fourneau, et si l'on ajoute à l'effet calorifique ou réductif de ce charbon celui qui résulte de la nouvelle distillation du goudron condensé dans le haut fourneau et de celui qui se dépose sur les corps très-échauffés qui entourent le bois lorsqu'il se distille, on arrivera à expliquer d'une manière satisfaisante l'économie de combustible. Peut-être aussi qu'en refroidissant la partie supérieure de la cuve, le bois empêche qu'une partie de l'acide carbonique produit dans la partie basse du fourneau ne se transforme en oxyde de carbone (1).

L'emploi du bois en nature a eu pour effet, à Vellexon et dans d'autres fourneaux placés dans les mêmes circonstances de roulement, de diminuer considérablement le rendement des minerais et la production journalière. Ainsi, en 1835

(1) Il serait fort intéressant de rechercher si, dans la transformation de l'acide carbonique en oxyde de carbone, transformation d'où résulte une perte considérable de combustible, il n'y a pas abaissement de température du gaz. Cette absorption de chaleur rendue latente paraît probable, si l'on considère : 1° que l'acide carbonique double de volume en se transformant en oxyde de carbone, et que cette transformation ne peut se faire que dans le cas où le charbon reçoit une grande quantité de chaleur extérieure; 2° que le calorique spécifique du gaz acide carbonique rapporté à l'unité de poids est seulement de 0,221, tandis que celui de l'oxyde de carbone est de 0,288; 3° que le charbon allumé plongé dans une atmosphère d'acide carbonique s'y éteint plus subitement que dans tout autre gaz; 4° enfin, si l'on ne suppose pas que cette absorption de chaleur ait lieu, il est très-difficile d'expliquer, par la seule considération des chaleurs spécifiques, comment il se fait, dans les fourneaux au charbon de bois, que la température de l'air, évaluée à 150 degrés pyrométriques dans l'ouvrage, soit aussi peu supérieure à celle de l'air extérieur au gueulard. (1838.)

et 1836, le haut fourneau de Vellexon, roulant à l'air froid et au charbon, fabriquait par mois de 100 à 115,000 kilogrammes de fonte, et les minerais employés rendaient régulièrement 35 pour 100. Actuellement la production mensuelle varie entre 65,000 et 75,000 kilogrammes, et le rendement des mêmes minerais ne dépasse pas 29 à 30 pour 100. Les chutes de minerai, dues à une descente irrégulière des charges, sont beaucoup plus fréquentes qu'au charbon.

La cause de cette diminution de produits me paraît être due tout entière à la faible cohésion des charbons provenant de la distillation du bois. On sait qu'une des conditions essentielles d'un bon roulement, c'est que l'air puisse circuler facilement dans toutes les parties de la masse comprise entre la tuyère et le gueulard. L'influence de la grosseur du charbon sur le roulement du fourneau est plus grande encore quand il consomme exclusivement des mines en grains qui viennent se loger dans les interstices du charbon. Si la majeure partie du charbon est en menu, il est évident que le courant d'air, dont la vitesse est assez considérable, ne pourra plus se répartir avec autant d'uniformité à travers la masse de la charge; il se portera tantôt d'un côté, tantôt d'un autre, et tendra à provoquer une descente irrégulière des matières, et, par suite, des chutes de minerais.

A l'appui de cette explication, je citerai les faits suivants :

1°. Le haut fourneau de Montagney (Doubs) a marché complétement au bois vert pendant quinze jours; les charges descendaient avec une extrême lenteur, et le fourneau se refroidissait progressivement. Pendant tout ce temps, on ne voyait passer à la tuyère aucun morceau de charbon de quelque grosseur. Pour rétablir le fourneau en bonne activité, il a fallu le remettre au charbon.

2°. C'est dans les fourneaux où l'on fond des minerais en morceaux d'une certaine grosseur que la diminution du produit journalier et du rendement des minerais a été le

moins sensible. Ainsi, on voit par le dernier Mémoire de M. Bineau que le haut fourneau de Massevaux, où l'on charge moitié de charbon et moitié de bois vert, et qui ne consomme que des minerais en roche et des scories de forges concassés en morceaux de la grosseur d'un œuf, produit par mois au moins autant de fonte qu'en roulant au charbon seul. Il en est tout autrement pour les fourneaux de la Saône, qui ne consomment que des minerais en petits grains.

Dans les hauts fourneaux où l'on ne consomme que 0,25 ou 0,33 de bois en nature, on ne s'est guère aperçu de la diminution du produit journalier; et ce fait s'explique facilement, car le charbon provenant de la distillation du bois n'entre que pour 0,12 ou 0,16 dans le volume total, et, par suite, son influence sur la marche du fourneau doit être fort peu sensible (1).

Dans les fourneaux où l'on emploie le bois torréfié ou charbon roux, je vois également, d'après le Mémoire de M. Sauvage, que la production mensuelle a diminué, et que le volume du vent, lancé par la machine soufflante, a été plus considérable que dans la marche au charbon.

L'expérience n'a pas encore prononcé d'une manière bien positive sur les meilleures formes à adopter pour l'intérieur des fourneaux au bois. Toutefois, d'après les résultats de quelques fondages, il paraitrait qu'il convient de rétrécir l'ouvrage, et de lui donner une plus grande hauteur que dans les fourneaux marchant au charbon de bois.

---

(1) Il y a, ce me semble, une certaine analogie entre les essais faits pour employer dans les hauts fourneaux une grande proportion de bois en nature, et ceux entrepris à Vizille pour employer l'anthracite au lieu de coke, pour la fusion des minerais. La lenteur et l'irrégularité de la descente des charges, le faible rendement des minerais ont été attribuées à l'état de division dans lequel l'anthracite se réduisait dans le fourneau sous l'influence de la chaleur. On n'a pu parvenir à un rendement passable, lorsqu'on a mêlé l'anthracite au coke au delà d'une certaine proportion. (*Annales des Mines*, tome IV, page [illegible])

III.

Essai sur la réduction des minerais de fer dans les hauts fourneaux.

Les faits consignés dans ce Mémoire résultent d'expériences exécutées au haut fourneau de Clerval sur la réduction des minerais de fer. J'ai pensé qu'il y aurait quelque intérêt à suivre les minerais au fur et à mesure qu'ils descendent dans le haut fourneau, afin d'apprécier de quelle façon s'opère la transformation de l'hydrate de peroxyde de fer en fer carburé, et quelle influence peut avoir sur cette réduction la nature des substances terreuses associées à la matière métallique.

L'appareil qui m'a permis de descendre les minerais dans le haut fourneau à d'assez grandes profondeurs au-dessous du gueulard, était de même nature que celui dont je m'étais servi pour cet usage dans des expériences faites en décembre 1837 au fourneau de Vellexon, et qui sont décrites à la page 162. Il consiste simplement en une cloche en tôle forte, dont la forme est celle d'un cône tronqué, et qui est terminée à sa partie supérieure par un anneau, tandis que sa base se ferme au moyen d'un disque maintenu par deux clavettes. La cloche et le disque sont percés d'un grand nombre de trous destinés à mettre les matières qu'elle contient en communication avec le courant de gaz extérieur.

L'appareil était placé à l'extrémité d'une chaîne très-forte qui passait sur la gorge d'une poulie en fer maintenue à 2 mètres environ au-dessus du gueulard. Des repères en fil de fer fixés de distance en distance aux anneaux de la chaîne permettaient d'apprécier, à un instant déterminé, la profondeur à laquelle la cloche se trouvait dans le fourneau. Pour la retirer, on employait un ringard dont le bout était engagé dans un des anneaux de la chaîne, et sur l'autre

extrémité duquel on appuyait, comme sur un levier, pour soulever l'appareil. Je ferai remarquer que l'on doit considérer comme un *maximum* la distance du gueulard déduite de la longueur de chaîne qui se trouve engagée dans le fourneau, bien qu'on ait pris toutes les précautions pour maintenir la chaîne verticale.

Les produits de ces expériences ont été enfermés encore chauds dans des flacons bien bouchés, jusqu'au moment où ils ont été examinés au laboratoire.

Les renseignements qu'on trouvera plus loin sur les dimensions et l'allure du haut fourneau, me dispensent d'entrer dans quelques détails à ce sujet. Le haut fourneau ne consommait que du charbon de meule pendant toute la durée des expériences.

Les matières qui ont été descendues dans la cloche, puis retirées du fourneau, sont les suivantes :

1°. Des charbons de meule. Ils renferment de 12 à 17 pour 100 de substances volatiles, indépendamment de l'eau hygrométrique.

2°. Le minerai calcaire de Laissey (Doubs). On en portait une forte proportion dans le lit de fusion. J'ai dit, t. I, p. 300, que bien qu'il ne contienne pas de protoxyde de fer, il s'est certainement déposé dans le prolongement de la couche exploitée à Aïssey. La présence du protoxyde de fer dans ce dernier minerai paraît liée d'une manière intime à celle de la matière bitumineuse que renferme le dépôt d'Aïssey. Le minerai de Laissey provient d'une couche exploitée par galeries à la partie inférieure des calcaires du premier étage jurassique. Il se compose de petits grains oolithiques d'hydroxyde de fer, disséminés dans une pâte argilo-calcaire. On le concasse en morceaux de la grosseur d'une noix, dont la richesse n'est pas constante, ce qui tient à l'irrégularité de composition de la couche exploitée. Quelques fragments pris au hasard sur le tas de minerai m'ont donné les nombres suivants :

Eau		0,100		
Carbonate de chaux		0,368		
Carbonate de magnésie		traces.		
Peroxyde de fer		0,362		
Oxyde de manganèse		0,004		
Oxyde de chrome		traces.		
Alumine soluble		0,030	Silice	0,126
Silice gélatineuse		0,038		
Résidu insoluble	Silice	0,088	Alumine	0,036
	Alumine	0,006		
		0,996		

Le résidu, insoluble dans les acides et la potasse caustique, se compose de grains de quartz hyalin faciles à reconnaître à la loupe, et mêlés avec une petite proportion d'argile très-blanche et très-légère.

Le minerai de Laissey renferme en outre une petite quantité d'acide phosphorique qui n'a pas été dosée. On y trouve aussi çà et là quelques grains de pyrite de fer.

3°. Le minerai de La Chapelle Saint-Quillain (Haute-Saône). Ce minerai est en grains bien ronds dont la grosseur ne dépasse pas celle d'un pois; sa poussière est d'un jaune brunâtre; elle ne renferme pas de grains magnétiques. Il contient :

Eau		0,150		
Peroxyde de fer		0,596		
Oxyde de manganèse		0,004		
Oxyde de chrome		traces.		
Alumine soluble		0,060	Alumine	0,072
Silice gélatineuse		0,056		
Résidu insoluble	Silice	0,122	Silice	0,178
	Alumine	0,012		
		1,000		

4°. Les scories d'affinage sur lesquelles j'ai expérimenté sont des scories riches, dites *sornes*, qui se produisent à la

fin de l'opération. Elles sont mal fondues et remplies de soufflures. Les acides les attaquent avec facilité et en dégagent une certaine quantité d'hydrogène. L'analyse suivante se rapporte à la poussière qui provient de la pulvérisation et du tamisage d'une masse assez considérable de ces scories :

Fer métallique.....	0,014
Protoxyde de fer.....	0,841
Protoxyde de manganèse.	0,007
Oxyde de chrome.....	0,008
Alumine....	0,002
Chaux.....	traces
Silice gélatineuse.....	0,086
Sable quartzeux.....	0,018
Charbon et perte.....	0,024
	1,000

La présence de l'oxyde de chrome en quantité aussi notable dans ces scories est un fait assez remarquable, et qui prouve que la fonte de Clerval renferme une certaine proportion de chrome, métal que l'on rencontre à la vérité, mais en quantité très-petite, dans tous les minerais qu'on y emploie (1).

Procédés d'analyse.

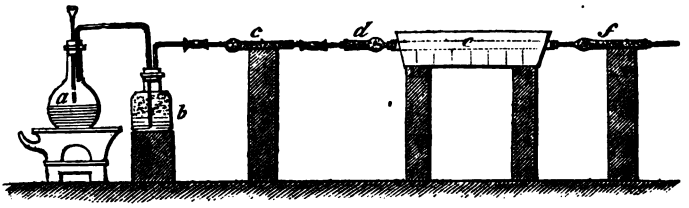
Les minerais retirés du haut fourneau renferment du peroxyde et du protoxyde de fer, et du fer métallique. Pour en déterminer la proportion relative, j'ai employé les moyens suivants.

Détermination du fer métallique.

Le procédé qui m'a paru le plus commode et le plus certain pour doser le fer métallique, consiste à en apprécier la

(1) On sait que le vanadium, métal dont l'analogie avec le chrome est si grande, a été rencontré pour la première fois dans des scories d'affinage.

quantité d'après le poids de l'hydrogène dégagé par l'action de l'acide chlorhydrique sur la substance essayée. Pour obtenir l'hydrogène avec une précision suffisante, voici quel a été l'appareil employé.



On place la matière à essayer au fond d'un petit ballon à fond plat *a*, de 60 à 90^{cc}, dont le col soit assez large pour qu'on puisse percer de deux trous le bouchon qu'on y adapte. Un de ces trous sert au passage d'un tube d'un petit diamètre, très-effilé à son extrémité inférieure et disposé en entonnoir à l'autre extrémité. L'autre reçoit un tube deux fois recourbé, dont la longue branche arrive dans le flacon *b* rempli de fragments de potasse caustique. Le gaz passe ensuite, au moyen d'un tube recourbé et d'un tuyau en caoutchouc, dans l'apparail *c* rempli de fragments de chlorure de calcium, puis traverse un tube en verre vert *e* rempli d'oxyde de cuivre et placé sur un petit fourneau en tôle à peu près semblable à ceux dont on se sert pour les analyses organiques, mais qui peut n'avoir que 0^{m},25 à 0^{m},30 de longueur. L'eau qui résulte de la combustion du gaz hydrogène par l'oxyde de cuivre vient se condenser dans l'appareil *f* qui contient du chlorure de calcium, et qui a été exactement taré avant l'expérience.

L'oxyde de cuivre, dont le tube *e* est rempli, est un mélange de planures grillées et de l'oxyde en petites masses assez volumineuses qui provient de la calcination du nitrate. Ce mélange présente l'avantage de n'opposer aucune résistance au passage du gaz. La combustion complète de celui-ci est d'ailleurs si facile, qu'il n'est pas nécessaire de faire rou-

gir le tube, et que l'on ne trouve du cuivre métallique que dans sa partie antérieure.

Avant de verser l'acide chlorhydrique sur la matière et d'adapter le tube taré *f*, on commence par chauffer le tube à oxyde de cuivre, puis on aspire par son extrémité postérieure. L'air entre par le tube entonnoir, se dessèche en traversant le petit flacon à potasse et le tube à chlorure de calcium, passe ensuite dans le tube à combustion, et entraîne avec lui toute l'eau hygrométrique de l'oxyde de cuivre; après quelques minutes d'aspiration, on ajuste le tube taré *f* et l'on verse l'acide avec précaution par le tube entonnoir. On peut se dispenser de faire plonger l'extrémité effilée de ce tube dans la liqueur. La capillarité y retient une petite quantité de liquide qui suffit pour empêcher le gaz de s'échapper. Le flacon *b* retient tout l'acide entraîné par le gaz, et les dernières parties de vapeur d'eau s'arrêtent dans le tube à chlorure. Lorsqu'on s'aperçoit que, malgré l'addition d'une nouvelle dose d'acide et l'action de la chaleur, il ne se dégage plus de gaz, on aspire doucement par l'extrémité du tube *f*. L'air qui entre par le tube entonnoir chasse le gaz hydrogène et le force à traverser la colonne d'oxyde de cuivre. Après 8 à 10 minutes d'aspiration, on peut être certain qu'il ne reste plus que de l'air dans tout l'appareil. L'excédant de poids du tube *f* sert à calculer la proportion de fer métallique.

Un équivalent d'eau, HO = 112,50, correspond à 1 équivalent de fer = 350,0.

1 gramme d'eau équivaudra à 3^{gr},017 de fer métallique.

Dans la plupart des analyses de matières contenant du fer à l'état métallique, j'ai fait deux expériences consécutives qui m'ont toujours donné des résultats bien concordants, ainsi qu'on pourra en juger d'après les nombres obtenus.

Quand on essaye des matières dont l'attaque par l'acide chlorhydrique se fait aisément sans qu'il soit nécessaire de

le faire bouillir, on peut supprimer le petit flacon rempli de potasse, en intercalant quelques fragments de cette substance au milieu du tube à chlorure de calcium; mais si l'on était obligé de faire bouillir l'acide, il pourrait arriver que le tube à chlorure s'obstruât par suite du gonflement que fait éprouver à la potasse sa combinaison avec l'acide chlorhydrique. Il est nécessaire d'ailleurs que le gaz soit bien dépouillé d'acide, puisque celui-ci produirait, en réagissant sur l'oxyde de cuivre, une quantité d'eau correspondante à l'hydrogène qu'il renferme.

Il peut arriver aussi, surtout lorsque l'attaque par l'acide chlorhydrique se fait avec quelque difficulté, et qu'ainsi le courant de gaz est lent, qu'il se dépose une petite quantité d'eau provenant de la combustion de l'hydrogène, dans la partie du tube *c* qui touche au tube à combustion. On pare très-facilement à cet inconvénient, en intercalant entre les deux tubes un très-petit appareil *d* contenant du chlorure de calcium, qui communique avec le tube à combustion par un bouchon et avec le tube *c* par un tuyau en caoutchouc. Au lieu de tarer l'appareil *f* seul avant l'opération, on tare à la fois les deux tubes *f* et *d*. La vapeur d'eau qui pourrait être refoulée en arrière, soit par le refroidissement du ballon, soit par toute autre cause, est retenue d'une manière complète dans l'appareil *d*.

Avec un peu d'habitude, on parviendra, je crois, à exécuter l'opération que je viens de décrire avec toute la précision désirable. On peut facilement, dans un jour de travail, effectuer deux essais de ce genre. L'appareil une fois monté peut servir à plusieurs opérations successives, en remplaçant toutefois, pour chacune d'elles, le tube taré qui sert à la détermination du fer métallique.

Détermination des deux oxydes de fer.

J'ai suivi, pour doser les deux oxydes de fer, le procédé général d'analyse que j'ai décrit plus haut, t. I, p. 232, et qui

consiste à déterminer la quantité d'oxygène absorbée par le mélange des deux oxydes pour leur transformation complète en peroxyde. La proportion d'oxygène absorbée a été dosée, dans chaque analyse, de deux manières différentes.

La première consistait à ajouter à la dissolution chlorhydrique des deux oxydes une quantité déterminée d'oxyde de manganèse, en recevant le chlore dégagé dans une dissolution d'acide sulfureux.

La deuxième méthode consiste à ajouter à la dissolution des deux oxydes de fer un mélange d'oxyde de manganèse et de soufre, en opérant comme s'il s'agissait d'essayer le minerai de manganèse lui-même. Une partie de l'oxygène abandonné par le peroxyde de manganèse sert à peroxyder la totalité du fer; l'excès d'oxygène se combine au soufre et forme de l'acide sulfurique qu'on dose à l'aide du chlorure de barium.

Pour écarter toutes les causes d'erreur, l'exécution de chacun de ces deux procédés exige quelques précautions. Il ne sera peut-être pas sans utilité de faire connaître ici celles que j'ai employées dans les essais dont on verra plus bas les résultats.

1°. *Emploi de l'acide sulfureux.*— L'acide sulfureux dont on se sert doit être complétement dépouillé d'acide sulfurique. Pour satisfaire à cette condition, sans être obligé de préparer pour chaque opération la quantité d'acide dont on a besoin, ce qui serait fort incommode, on peut, comme je l'ai déjà indiqué, conserver la dissolution de gaz sulfureux mêlée de chlorure de barium, qui précipite l'acide sulfurique au fur et à mesure de sa formation; mais on parviendra à un résultat plus certain en faisant arriver, dans la liqueur qui reçoit le chlore, le gaz dégagé par la chaleur d'une solution concentrée, soit ancienne, soit récente, d'acide sulfureux.

Cela posé, voici comme on opère. On prend un ballon à fond plat de 3 à 4 décilitres de capacité, à col très-large.

On le remplit à moitié environ d'eau distillée, qu'on fait bouillir pour chasser complétement l'air qu'elle renferme. Après quelques minutes d'ébullition, on fait arriver dans le ballon un courant d'acide carbonique provenant d'un flacon à deux tubulures, muni d'un entonnoir destiné à verser de l'acide chlorhydrique, et d'un tube deux fois recourbé qui sert à la sortie du gaz. L'acide carbonique chasse l'air du ballon en vertu de sa plus grande densité. Quand on pense que le ballon est rempli d'acide carbonique à peu près pur, on place dans un très-petit ballon à fond plat la quantité de minerai sur laquelle on opère, 2 à 3 grammes ordinairement. On verse par-dessus une quantité convenable d'acide chlorhydrique pur et concentré; on ajuste un tube deux fois recourbé, et l'on pousse rapidement la liqueur à l'ébullition. La dissolution s'opère complétement dans peu de temps, et les vapeurs d'acide chassent tout l'air du petit ballon. Après quelques minutes d'ébullition, on enlève le feu, et l'on place le petit ballon de manière que l'extrémité du tube recourbé plonge dans le ballon rempli d'acide carbonique. Au moyen de cette précaution, le gaz qui rentre dans le petit ballon après la condensation de la vapeur est de l'acide carbonique presque pur, et l'on peut laisser refroidir la dissolution ferreuse sans craindre qu'elle ne se suroxyde par le contact de l'air. Lorsque le refroidissement est complet, ce qui exige peu de temps, en raison du faible volume de la liqueur, on enlève le petit ballon, et l'on fait arriver dans l'eau, par un tube deux fois recourbé, le gaz sulfureux provenant d'une solution concentrée que l'on chauffe progressivement. On continue toujours, et pendant toute la durée de l'opération, de faire dégager du gaz carbonique. Quand le gaz qui sort du ballon où plongent les deux tubes exhale l'odeur de l'acide sulfureux, on débouche le petit ballon qui renferme la solution des deux oxydes de fer, et l'on y verse une certaine quantité d'oxyde de manganèse pesée exactement. On ajoute par-

dessus une nouvelle dose d'acide, puis on remet en place le tube recourbé qu'on fait plonger alors dans l'eau qui reçoit en même temps le courant de gaz acide carbonique et celui de gaz sulfureux. La quantité de chlore qui se dégage d'abord est très-faible, jusqu'à ce que la totalité du fer soit peroxydée. Au reste, on peut faire marcher l'opération aussi rapidement que l'on veut. L'absorption du chlore est toujours complète, pourvu qu'il y ait excès d'acide sulfureux dans le ballon central. Les deux gaz réagissent l'un sur l'autre volume à volume en vertu de la réaction $SO^2 + Cl + HO$, et il est facile de régler leur dégagement, en conservant toujours un excès d'acide sulfureux, ce dont on s'aperçoit d'ailleurs à l'odeur du gaz acide carbonique qui sort du flacon. A la fin de l'opération, quand la liqueur ferrugineuse perd la teinte brune qu'elle doit au peroxyde de manganèse, on fait bouillir la dissolution avec vivacité pour chasser tout le chlore. Pour éviter l'absorption, il faut alors soulever le tube recourbé, de telle sorte qu'il ne plonge plus dans la liqueur. Cela ne nuit en rien au succès de l'opération, puisque le chlore se trouve mêlé à une atmosphère d'acide sulfureux humide sur laquelle il agit comme sur la solution aqueuse.

Lorsque la réaction est terminée, on enlève les trois tubes, on ajoute à la liqueur un excès de chlorure de barium, puis on la fait bouillir rapidement pour chasser l'excès de gaz sulfureux. Il convient de placer sur le ballon un tube recourbé, afin d'éviter l'accès de l'air, etc. Le sulfate de baryte obtenu donne le moyen de calculer la proportion de protoxyde de fer que renferme la matière essayée.

Le procédé dont je viens de donner la description détaillée paraîtra peut-être un peu compliqué, mais il ne présente réellement pas de difficultés dans l'exécution, et l'on peut réussir à la première opération comme avec une longue habitude. Il faut avoir soin de placer les ballons

qui renferment l'acide sulfureux liquide, la dissolution ferreuse, et celui où s'opère la réaction, sur trois fourneaux recouverts chacun d'une grille en fil de fer. Il convient aussi de fermer le ballon central avec un bouchon percé de trois orifices pour donner passage aux trois tubes, en les laissant toutefois un peu plus larges que ceux-ci, afin que le maniement des appareils soit commode, et que l'excès de gaz puisse se dégager facilement.

Lorsque la substance essayée s'attaque aisément, par l'acide chlorhydrique, on peut se dispenser de la dissoudre avant d'ajouter l'oxyde de manganèse, et se contenter de verser l'acide sur un mélange des deux matières; mais en opérant ainsi, on pourrait craindre, dans quelques cas, que la totalité de l'oxyde de manganèse ne fût dissoute avant la substance ferreuse, et qu'ainsi une portion de protoxyde de fer n'échappât à la suroxydation.

Avant de commencer les essais, j'ai dû rechercher la proportion du sulfate de baryte que donne le minerai de manganèse dont je me suis servi. C'est un peroxyde anhydre en fibre cristalline, probablement du manganèse de Cretnick.

I. 1 gramme, essayé avec les précautions indiquées plus haut, a donné, sulfate de baryte.....		gr 2,325
II. 1gr,360 du même, ont donné, sulfate de baryte.....	gr 3,168	
Ou pour 1 gramme.....		2,329
III. 0gr,483, ont donné, sulfate de baryte..	1,130	
Ou pour 1 gramme.....		2,339
Moyenne des trois essais, sur 1 gramme..		2,331

La différence entre le sulfate de baryte obtenu dans un essai, et celui qu'aurait donné l'oxyde de manganèse essayé seul, permet de calculer le protoxyde de fer. Une différence de 1 gramme correspond à 0gr,602 de protoxyde de fer.

Quant à l'erreur que l'on peut commettre dans ce dosage,

on voit que, pour chacun des essais rapportés ci-dessus, le poids du sulfate de baryte obtenu diffère de la moyenne de moins de $0^{gr},01$. Si donc on opère sur 2 grammes de matière ferrugineuse, la limite de l'erreur sur la détermination du protoxyde de fer sera de 0,3 pour 100.

2°. *Emploi du soufre.*— Ce procédé diffère du précédent, en ce que l'excès de chlore résultant de l'action de l'acide chlorhydrique sur l'oxyde de manganèse est absorbé dans le vase même où s'est opérée la suroxydation du protoxyde de fer. La quantité d'acide sulfurique produit par la réaction du chlore sur le soufre, comparée à celle que l'oxyde de manganèse aurait donnée seul, permet d'évaluer, comme dans le premier procédé, la proportion de peroxyde de fer contenue dans la substance essayée. Seulement, comme une même quantité de chlore produit trois fois plus d'acide sulfurique avec l'acide sulfureux qu'avec le soufre, il est évident que, pour une différence de 1 gramme sur le sulfate de baryte obtenu, la quantité de protoxyde de fer correspondante sera de :

$$3 \times 0,602 = 1^{gr},806.$$

Pour exécuter l'opération, on introduit le minerai à essayer dans un ballon à fond plat de 370^{cc} environ. On remplit ce ballon de gaz acide carbonique, puis on y verse une certaine quantité d'acide chlorhydrique pur, et l'on chauffe. Quand la dissolution du minerai est terminée, on remplit le ballon à moitié d'eau bouillante, et l'on y introduit le mélange d'oxyde de manganèse et de soufre, avec une nouvelle dose d'acide chlorhydrique. On ajuste sur le ballon un bouchon muni d'un tube recourbé en forme de Λ, et l'on fait bouillir à gros bouillons jusqu'à dissolution complète de l'oxyde de manganèse. Lorsqu'on n'aperçoit plus de grains noirs avec le soufre, et que la couleur du liquide est celle d'une dissolution de perchlorure de fer, on étend d'eau, on filtre pour séparer le soufre, on évapore à

siccité la liqueur filtrée pour séparer la silice qui aurait pu rester en dissolution; puis, on reprend par l'eau et l'acide chlorhydrique, on filtre de nouveau, et l'on précipite l'acide sulfurique dans la liqueur filtrée au moyen du chlorure de barium.

Cette méthode peut donner de très-bons résultats quand l'oxyde de manganèse est convenablement choisi. Il faut employer autant que possible un oxyde facile à attaquer par l'acide chlorhydrique, quoiqu'on puisse réussir avec d'autres plus compactes et plus difficiles à dissoudre.

Pendant toute la durée de l'opération, on remarque que la vapeur d'eau entraîne une petite proportion de soufre : il se dépose même une certaine quantité de ce corps en particules cristallines, à l'extrémité du tube recourbé par où s'échappe la vapeur. C'est sans doute à cette propriété que possède le soufre d'être entraîné à l'état de vapeur qu'il convient d'attribuer la réussite de ce procédé que j'ai employé d'abord pour l'analyse des minerais de manganèse. Le chlore se trouve en contact à l'état naissant avec de la vapeur de soufre, un grand excès de vapeur d'eau et des bases salifiables puissantes, et il est facile de concevoir que, sous ces influences réunies, il soit absorbé en totalité. En traitant par l'acide chlorhydrique concentré et froid un mélange d'oxyde de manganèse et de soufre, il se dégage beaucoup de chlore mêlé d'une certaine quantité de chlorure de soufre. D'autre part, j'ai placé dans un tube en verre fort large du verre en fragments saupoudrés de fleur de soufre mouillée. Ce tube, long de $0^m,25$, a été placé dans l'eau bouillante. Par une de ses extrémités, j'ai fait arriver à la fois de la vapeur d'eau en grand excès et du chlore; la vapeur qui se dégageait à l'extrémité opposée du tube renfermait beaucoup de chlore, et possédait même une odeur très-distincte de chlorure de soufre. Tous ces faits me paraissent prouver que le soufre n'agit d'une manière complète sur le chlore à l'état naissant qu'en se transformant

lui-même en vapeur. Si, à un instant déterminé, la quantité de chlore qui échappe à l'action du soufre solide est plus considérable que celle correspondante au soufre entraîné par la vapeur d'eau, il est évident qu'une certaine portion du chlore pourra se dégager; et c'est ce qui arrive effectivement quand la dissolution du minerai s'opère trop vite ou dans une liqueur trop acide.

Le minerai de manganèse dont je me suis servi est le minerai de Gy (Haute-Saône), dont on trouvera l'analyse au t. I, p. 268. On en a trié une certaine quantité pour séparer une partie du calcaire qu'il renferme.

3gr de ce minerai trié, traités avec 5gr de fleur de soufre lavée à l'eau bouillante, ont donné, sulfate de baryte.....	gr 0,85	
Ou pour 1 gramme.....		gr 0,283
6gr de même minerai ont donné, sulfate de baryte.....	1,69	
Ou pour 1 gramme.....		0,282
9gr du même minerai ont donné, sulfate de baryte.....	2,56	
Ou pour 1 gramme.....		0,284
Moyenne, sur 1 gramme.....		0,283

Cette quantité de sulfate de baryte ne représente pas tout l'oxygène du minerai. Celui-ci renferme de la baryte qui précipite une certaine quantité d'acide sulfurique : ce sulfate de baryte reste mêlé avec l'argile et l'excès de soufre; il n'est pas nécessaire d'en tenir compte dans les expériences qui ont rapport à la détermination de l'oxygène absorbé par les substances que l'on essaye.

Expériences sur la réduction des minerais.

Je dois maintenant rendre compte des expériences faites dans le haut fourneau et des résultats donnés par l'analyse des matières qui en ont été retirées.

Expérience N° 1.

On a placé dans la cloche en tôle du minerai en grains de La Chapelle, du minerai de Laissey en morceaux assez volumineux, et des fragments de charbon de halle. La cloche a été jetée dans le fourneau entre le charbon et le minerai : on l'a retirée deux heures après; on avait chargé deux fois dans l'intervalle. La cloche se trouvait à 2^{m},50 de profondeur, elle n'était pas rouge; les minerais et les charbons ont été enfermés séparément dans des vases bien bouchés.

Essai du charbon. — Le charbon calciné en vase clos à la chaleur blanche a donné :

Matières volatiles.....	0,128
Charbon et cendres....	0,872
	1,000

Ce charbon ne paraît avoir éprouvé encore aucune altération dans le fourneau.

Essais des minerais. — I. Le minerai de La Chapelle a sa poussière d'un rouge foncé tirant un peu sur le noir. Une portion notable de cette poussière s'attache déjà au barreau aimanté; par calcination, il perd encore une certaine quantité d'eau.

1°. 3^{gr} ont été traités par 0^{gr},500 d'oxyde de manganèse et par l'acide sulfureux.

	gr
Le sulfate de baryte obtenu pesait.....	1,010
Or, 0^{gr},500 d'oxyde auraient donné seuls.....	1,165
Différence.....	0,155
Correspondant à protoxyde de fer.....	0,093
Sur 1 gramme.....	0,031

2°. 5^{gr} du même minerai ont été traités par 3^{gr} de manganèse de Gy, mêlés de 5^{gr} de soufre.

	gr
On a eu, sulfate de baryte.....	0,760
Les 3gr auraient donné seuls.....	0,850
Différence.....	0,090
Protoxyde de fer.....	0,163
Ou pour 1 gramme.....	0,033
Moyenne des deux expériences.....	0,032

Joignant ce résultat à ceux fournis par l'analyse, on trouve pour la composition du minerai :

Eau.....		0,052	
Protoxyde de fer.....		0,032	
Peroxyde de fer.....		0,634	
Oxyde de manganèse...		0,004	
Alumine soluble.....		0,066	
Silice gélatineuse.		0,060	
Argile	Silice.....	0,132	0,152
	Alumine	0,020	
		1,000	

D'après la proportion de protoxyde de fer, le minerai renferme :

Oxyde magnétique.....	0,104
Peroxyde de fer.....	0,562
	0,666

II. Le minerai calcaire de Laissey ne paraît pas avoir éprouvé de commencement de réduction. Sa poussière est d'un rouge clair sans nuance de brun; à peine quelques parcelles s'attachent-elles au barreau aimanté. Il renferme encore une certaine quantité d'eau qui a été dosée directement. Il contient :

Eau.....	0,038
Carbonate de chaux.....	0,410
Peroxyde de fer.....	0,370
Protoxyde de fer.....	trace.
Oxyde de manganèse.....	0,004
Oxyde de chrome.....	trace.
Alumine soluble.....	0,032
Quartz et silice gélatineuse.	0,146
	1,000

Expérience N° 2.

On a descendu dans le fourneau les mêmes minerais que dans l'expérience précédente. La cloche est restée $4^h\ 25^m$ dans le fourneau. Lorsqu'elle a été retirée, elle se trouvait à 4^m, 35 de profondeur : on a chargé six fois dans l'intervalle. La cloche, au moment où elle est sortie du fourneau, paraissait chauffée au rouge sombre.

Essai du charbon. — L'analyse du charbon par calcination rapide, au creuset de platine, a donné pour résultat :

Matières volatiles.....	0,065
Charbon et cendres.....	0,935
	1,000

Essais des minerais. — I. La poussière du minerai de La Chapelle est devenue d'un noir pur; elle est complétement attirable au barreau aimanté. Les grains de minerai n'ont pas changé de forme; ils sont plus faciles à écraser qu'auparavant. L'acide chlorhydrique attaque facilement le minerai sans dégagement de gaz, mais la liqueur s'échauffe très-sensiblement.

Deux essais ont été faits pour déterminer la proportion du protoxyde de fer.

1°. 2^{gr} ont été traités par 1^{gr} de peroxyde de manganèse et par l'acide sulfureux :

Le sulfate de baryte pesait.....	1,250
1 gramme d'oxyde de manganèse aurait donné....	2,330
Différence.....	1,080
Protoxyde de fer, sur 1 gramme.....	0,325

2°. 3^{gr} du même ont été traités par 3^{gr} de manganèse de Gy, et 5^{gr} de soufre :

Le sulfate de baryte pesait.....	0,310
3 grammes de manganèse auraient donné.....	0,850
Différence.....	0,540
Protoxyde de fer, sur 1 gramme.....	0,326

L'analyse a donné :

Perte au feu		0,006
Protoxyde de fer		0,325
Peroxyde de fer		0,330
Oxyde de manganèse		0,005
Alumine soluble		0,082
Silice gélatineuse		0,070
Résidu insoluble	Silice	0,168
	Alumine	0,014
		1,000

D'après la proportion relative des deux oxydes de f trouve par le calcul que le minerai doit renfermer :

Oxyde des battitures	0,290
Oxyde magnétique	0,365
	0,655

II. La poussière du minerai de Laissey est de noire : elle fait une vive effervescence avec les acides. L carbonique a été dosé directement (1), et comme le ainsi trouvé est celui que perd le minerai par une calcination, on peut en conclure qu'il ne renferm sensiblement d'eau. La chaux correspond d'ailleurs tement à l'acide carbonique contenu.

Trois opérations ont été faites pour déterminer l portion du protoxyde de fer.

(1) Pour doser l'acide carbonique, j'ai employé le moyen suiva place la substance à essayer au fond d'un petit ballon à fond plat, quel on ajuste un bouchon muni d'un tube entonnoir et d'un aut recourbé à angle droit. On verse de l'acide chlorhydrique très-éten le tube entonnoir; l'acide carbonique s'échappe par l'autre tube, se d en passant sur un appareil à chlorure de calcium, puis s'absorbe condenseur à potasse de M. Liebig, lequel communique avec le tube rure de calcium. A la fin de l'opération, on aspire par l'extrémité l condenseur; l'air rentre par le tube entonnoir et chasse tout l'acide nique dans le condenseur à potasse, dont l'excès de poids donne la q d'acide carbonique dégagé. Lorsque l'acide chlorhydrique est suffisa étendu, l'acide carbonique n'en entraîne pas sensiblement, même tant le liquide à l'ébullition.

1°. 3^{gr} de minerai ont été traités par 1^{gr} d'oxyde de manganèse et par l'acide sulfureux, on a trouvé :

Sulfate de baryte.....	1,680
1 gramme de manganèse aurait donné.....	2,330
Différence.....	0,650
Protoxyde de fer sur 1 gramme.....	0,130

2°. 2^{gr} du même ont été traités par 0^{gr},50 de manganèse et par l'acide sulfureux, on a trouvé :

Sulfate de baryte.....	0,745
0,50 auraient donné seuls.....	1,165
Différence.....	0,420
Protoxyde de fer, sur 1 gramme.....	0,126

3°. 6^{gr} ont été traités avec 4^{gr} de manganèse de Gy et 7^{gr} de soufre :

Le sulfate de baryte pesait.....	0,720
Les 4^{gr} auraient donné	1,130
Différence.....	0,410
Protoxyde de fer, sur 1 gramme.....	0,124
Moyenne des trois expériences..... ..	0,127

Réunissant ce résultat à ceux fournis par l'analyse, on trouve pour la composition du minerai :

		Oxygène.	Rapport.
Carbonate de chaux.....	0,406		
Protoxyde de fer.....	0,127	0,0289	1
Peroxyde de fer.....	0,278	0,0853	3
Oxyde de manganèse.....	0,004		
Alumine soluble.....	0,031		
Silice gélatineuse et sable..	0,154		
	1,000		

Le fer se trouve tout entier dans le minerai à l'état d'oxyde magnétique.

Expérience N° 3.

On a placé dans la cloche en tôle les mêmes matières que dans l'expérience précédente. La cloche est restée 5^h 30^m dans le fourneau. On l'a retirée à la profondeur de 5 mètres, c'est-à-dire à $0^m,70$ seulement au-dessus du grand ventre. On a passé huit charges dans l'intervalle. La cloche était rouge-cerise au moment où elle a été retirée du fourneau. La chaîne était rouge jusqu'à 4 mètres environ du gueulard.

Essai du charbon. — Le charbon retiré du fourneau a donné à l'analyse immédiate :

Matières volatiles.....	0,032
Charbon et cendres	0,968
	1,000

Essais des minerais. — I. Le minerai de La Chapelle n'a pas changé de forme; sa poussière est d'un noir tirant sur le gris, très-magnétique. Traitée par l'acide chlorhydrique, elle se dissout rapidement en laissant dégager quelques bulles très-petites de gaz hydrogène.

Deux expériences ont été faites pour y rechercher la proportion de protoxyde de fer.

La première, faite avec l'acide sulfureux, a donné : protoxyde de fer, sur 1 gramme..... $0^{gr},41$
La seconde, faite avec le soufre et le minerai de Gy, a donné : protoxyde..... 0,42
Moyenne des deux expériences..... 0,41

L'analyse du minerai a donné les nombres suivants :

Fer métallique.....		traces.
Protoxyde de fer.....		0,418
Peroxyde de fer.....		0,260
Oxyde de manganèse.....		0,006
Alumine soluble.....		0,080
Silice gélatineuse.....		0,078
Résidu insoluble	Silice...	0,148
	Alumine.	0,010
		1,000

D'après la proportion relative des deux oxydes de fer, le minerai doit renfermer :

Oxyde de battitures.....	0,509
Oxyde magnétique.....	0,169
	0,678

II. Le minerai de Laissey fait encore une vive effervescence avec les acides. Sa poussière est d'un gris foncé. Traitée par l'eau, elle donne une liqueur qui précipite légèrement par l'oxalate d'ammoniaque, ce qui prouve qu'une partie de la chaux se trouve à l'état caustique. Par calcination à une forte chaleur blanche, la matière perd les 0,12 de son poids, et s'agglomère fortement. Deux expériences ont été faites pour déterminer directement la proportion d'acide carbonique :

	gr
1°. 5 gr., traités de la manière indiquée plus haut, ont donné : acide carbonique.....	0,580
2°. 5 gr., traités de même, ont donné : acide carbonique	0,582

Résultats qui s'accordent très-bien entre eux et avec le résultat de la calcination.

Deux essais ont été faits pour déterminer la quantité de protoxyde de fer :

	gr
Le premier, où l'on a employé l'acide sulfureux, a donné : protoxyde de fer, sur 1 gramme.....	0,178
Le second, où l'on s'est servi d'oxyde de manganèse de Gy et de soufre, a donné : protoxyde de fer....	0,172
Moyenne des deux essais.....	0,175

Joignant ce résultat à ceux fournis par l'analyse, on trouve que le minerai contient :

Protoxyde de fer.....	0,175
Peroxyde de fer.....	0,241
Oxyde de manganèse.....	0,004
Alumine soluble.....	0,040
Carbonate de chaux.....	0,266
Chaux caustique.....	0,040
Silice gélatineuse.....	0,047
Argile et sable.....	0,173
	0,986

D'après la proportion des deux oxydes de fer, le mi renferme :

Oxyde de battitures..... .	0,109
Oxyde magnétique.....	0,307
	0,416

Expérience N° 4.

Dans cette expérience, j'ai cherché à apprécier la nière dont s'opère la réduction des scories de forge com à celle du minerai en grains et du minerai calcaire. l pendamment de ces trois substances et du charbon avec elles, j'ai placé dans la cloche des fragments asse lumineux de briquettes faites avec un mélange de la r scorie pulvérisée, de poudre de charbon et de chaux été Pour faire ces briquettes, on a pilé à la dame une cer quantité de scories riches ou *sornes*, et on a pris la pous qui a traversé un tamis en fil de fer dont les trous av $0^m,001$ de côté. On y a mêlé 12 pour 100 de son poi poussière de charbon de halle, et à peu près 25 pour de chaux grasse qu'on a réduite en bouillie avant (mêler au reste de la poudre. Avec ce mélange bien p on a pu faire des briquettes qui ont pris au soleil ass dureté pour résister à la pression du doigt.

La cloche contenant ces différentes matières a été dans le fourneau entre le charbon et le minerai. Elle restée 6^h 25^m. On a passé onze charges dans l'intervall qui fait une charge par 35 minutes. Ce jour-là, le four marchait plus vite qu'à l'ordinaire. La longueur de cl engagée dans le fourneau était de $5^m,70$, longueur ég la hauteur de la cuve. La cloche, au moment où ell retirée, est encore chauffée au rouge. Le fer paraît avo ramolli par la chaleur, car la cloche est sensiblemen formée.

Essai du charbon. — Le charbon retiré de l'apparei raît avoir perdu à peu près la totalité de ses parties

tiles. Il a donné par la calcination à la chaleur blanche prolongée pendant une demi-heure :

Matières volatiles	0,008
Cendres et charbon.....	0,992
	1,000

Essais des minerais. — I. Le minerai de La Chapelle a déjà éprouvé un commencement de fusion. Les grains sont soudés les uns aux autres, sans cependant avoir perdu tout à fait leur forme. Leur surface est luisante et indique un commencement de scorification. On peut les piler assez facilement. La poussière est d'un gris de fer ; elle renferme déjà une quantité considérable de fer métallique qui s'aplatit et prend l'éclat métallique sous le pilon. Les acides en dégagent beaucoup d'hydrogène qui possède la même odeur que celui obtenu avec la limaille de fer, ce qui prouve que le fer a déjà pris une petite quantité de carbone. Quand on l'attaque par l'acide chlorhydrique concentré, et qu'on maintient l'ébullition pendant quelques heures, on finit par décomposer presque entièrement le silicate formé, et l'on obtient pour résidu de cette attaque, après avoir enlevé la silice gélatineuse par la potasse caustique, une matière presque blanche qui ne retient plus qu'une trace de protoxyde de fer.

Deux opérations ont été faites pour déterminer la proportion de fer métallique :

1°. 4gr,290 de matière ont donné :

	gr
Eau.....	0,3790
Fer métallique, sur 1 gramme.	0,2664

2°. 3gr,983 ont donné :

Eau.....	0,3550
Fer métallique, sur 1 gramme.	0,2685
Moyenne des deux expériences.	0,2670

L'analyse a donné :

			Oxygène.	
	Fer métallique	0,267		
Silicate attaquable par l'acide chlorhydrique 0,649.	Protoxyde de fer....	0,350	0,083	0,
	Oxyde de manganèse.	0,006	0,001	
	Alumine soluble.....	0,073	0,034	
	Oxyde de chrome....	traces		
	Chaux	0,004	0,001	
	Silice gélatineuse....	0,216	0,112	
Résidu insoluble 0,076	Silice.....	0,046		
	Alumine	0,030		
		0,992		

Si l'on compare le résultat de cette analyse avec les p cédentes, on voit que la majeure partie de l'argile mêl l'hydroxyde de fer dans le minerai a été attaquée et tra formée par le protoxyde de fer en silicate. Le résidu in luble dans l'acide chlorhydrique renferme proportionn lement beaucoup plus d'alumine que le silicate solul effet qui tient sans doute à ce que l'alumine, se trouvan grande partie dans le minerai à l'état d'hydrate, se diss dans le silicate de fer plus difficilement que l'argile; et l sait d'ailleurs que l'alumine fortement calcinée devie peu près insoluble dans les acides. On peut remarq aussi que, dans le silicate formé, la silice contient à près autant d'oxygène que les bases. En ramenant sa co position à l'unité, on trouve :

Silice.....	0,332
Alumine.....	0,112
Protoxyde de fer.....	0,541
Oxyde de manganèse..	0,009
Chaux.....	0,006
Oxyde de chrome.....	traces.
	1,000

II. Le minerai de Laissey a conservé sa forme. Sa po sière est devenue d'un gris clair. On distingue très-b

dans la cassure des morceaux les parties calcaires des oolithes ferrugineuses. Lorsqu'on traite le minerai par les acides, il se produit une effervescence assez vive; mais le gaz qui se dégage est de l'hydrogène pur, et ne trouble pas l'eau de baryte.

Deux expériences ont été faites pour doser le fer métallique.

1°. 4gr,140 ont donné dans l'attaque par l'acide chlorhydrique :

Eau	0,1390
Fer métallique, sur 1 gramme	0,1010

2°. 5 grammes du même ont donné :

Eau	0,1650
Fer métallique, sur 1 gramme	0,0996
Moyenne des deux expériences	0,1000

Joignant ce résultat à ceux que l'analyse a fournis, on aura :

Fer métallique	0,100
Protoxyde de fer	0,302
Oxyde de manganèse	0,004
Oxyde de chrome	traces.
Chaux	0,374
Alumine soluble	0,030
Silice gélatineuse	0,064
Résidu insoluble (quartz)	0,122
	0,996

En faisant traverser par du gaz acide sulfureux une dissolution bouillante de ce minerai faite par l'acide chlorhydrique à l'abri du contact de l'air, et essayant ensuite la liqueur par le chlorure de barium, je me suis assuré qu'elle ne renfermait pas de peroxyde de fer, car la quantité de sulfate de baryte formé était à peine sensible. Or, M. Berthier a démontré qu'en cémentant du peroxyde de fer dans du charbon, l'oxyde des battitures passe immédiatement à l'état de fer métallique, et, d'un autre côté, qu'en dissol-

vant dans les acides le mélange de fer métallique et d'oxyde des battitures, la dissolution renfermait une certaine quantité d'oxyde rouge. Ainsi donc il y a tout lieu de croire qu'il s'est formé ici une combinaison entre le protoxyde de fer et la silice, bien que la silice gélatineuse soit en assez faible proportion dans le minerai, et qu'elle s'y trouve avec une quantité considérable de chaux caustique.

On peut remarquer aussi que l'analyse a donné une proportion de chaux plus considérable que celle contenue moyennement dans le minerai. J'ai déjà fait observer que tous les morceaux de ce minerai n'avaient pas la même richesse. L'analyse ci-dessus se rapporte à des fragments où la proportion du calcaire était plus forte que la moyenne.

III. Les fragments de sornes n'ont éprouvé aucun changement dans leur forme ni dans leur cassure. Seulement leur surface est d'un gris pâle et prend sous le frottement l'éclat métallique. Mais cette réduction par cémentation ne paraît pas avoir pénétré à une grande profondeur.

La composition moyenne des morceaux a été trouvée comme il suit :

5 grammes ont donné :

	gr
Eau	0,078
Fer métallique, sur 1 gramme	0,047

L'analyse a donné :

Fer métallique	0,047
Protoxyde de fer	0,822
Oxyde de manganèse	0,007
Oxyde de chrome	0,008
Alumine	0,004
Silice	0,102
Sable	0,010
	1,000

Si l'on considère que la sorne avant l'expérience contenait déjà 0gr,014 de fer métallique, on verra que la réduc—

tion a été presque nulle. Si la scorie eût renfermé 20 à 25 pour 100 de silice, comme les scories coulantes qui se produisent au commencement de l'affinage, il est très-probable qu'elle serait entrée en fusion complète à la profondeur à laquelle elle se trouvait dans le fourneau, et sa réduction eût été moins avancée encore que celle de la sorne, en raison de la présence d'une plus grande quantité de silice combinée.

IV. La briquette ne s'est pas réduite en poussière dans la cloche, ainsi qu'on aurait pu le craindre. Seulement les différents fragments se sont arrondis par suite du frottement. Sa poussière est d'un gris très-pâle.

Deux expériences ont été faites pour le dosage du fer métallique.

1°. 5 grammes ont donné :

	gr
Eau	0,4800
Fer métallique, sur 1 gramme.	0,2896

2°. 5 grammes ont donné :

Eau	0,4780
Fer métallique, sur 1 gramme.	0,2884
Moyenne des deux essais	0,2890

L'analyse a donné :

Fer métallique	0,289
Protoxyde de fer	0,320
Oxyde de manganèse	0,005
Oxyde de chrome	0,004
Chaux	0,168
Alumine	0,012
Silice gélatineuse	0,132
Résidu insoluble	0,054
Charbon	0,012
Soufre	0,001
	0,997

En comparant cette analyse à celle de la sorne pulvérisée, on voit que la proportion de silice gélatineuse et de sable est plus forte que dans la sorne, ce qu'il faut attribuer aux matières terreuses que renfermait le fraisil de halle employé. On voit aussi qu'il ne reste plus dans la briquette qu'une quantité insignifiante de charbon; tout le reste a été volatilisé, soit par la réduction du protoxyde de fer, soit par la décomposition de l'eau de l'hydrate de chaux.

La comparaison de cette analyse avec la précédente montre tout l'avantage qu'on peut tirer de la préparation des scories de forges, au moyen de la chaux éteinte et du charbon. Depuis longtemps M. Berthier avait recommandé ce moyen d'utiliser ces scories, et ses prévisions à cet égard se trouvent complétement vérifiées par l'expérience précédente. (*Voie sèche*, tome II, pages 304, et *Annales des Mines*, tome XIII, page 719.)

Pour compléter la série des analyses dont je viens de donner les résultats, j'y joindrai celle du minerai que j'ai recueilli dans le creuset du haut fourneau de Vellexon, en décembre 1837. Aussitôt après la coulée, on trouvait le creuset rempli de minerais qui avaient criblé à travers le charbon et qui étaient mélangés avec de petits morceaux de charbon et de chaux caustique. Une grande partie de ces grains s'aplatissait un peu sous le marteau, en prenant l'éclat métallique. Leur cassure est d'un gris clair. Quand on traite cette matière par l'acide chlorhydrique concentré et bouillant, on dissout avec le fer métallique une certaine quantité d'oxydes de fer et de manganèse avec de l'alumine. Si l'on enlève ensuite dans le résidu la silice gélatineuse par la potasse, et qu'on analyse la partie insoluble au moyen du carbonate de potasse, on trouve qu'elle a, à peu près, la même composition que la partie attaquée par l'acide chlorhydrique, déduction faite du fer métallique. Il est assez probable, d'après cela, que le fer métallique est accompagné d'un silicate d'alumine, de protoxydes de fer et de manga-

nèse, qui ne se dissout qu'avec difficulté et en partie seulement dans l'acide chlorhydrique bouillant.

L'analyse a été faite sur la partie de la matière attirable au barreau aimanté. On a séparé ainsi les petits fragments de charbon et de chaux caustique.

Deux expériences ont été faites pour doser le fer.

1°. 3 grammes ont produit :

Eau	0,507
Fer métallique, sur 1 gramme	0,510

2°. 3 grammes ont donné :

Eau	0,503
Fer métallique, sur 1 gramme	0,506
Moyenne des deux analyses	0,508

L'analyse a donné :

	Fer métallique	0,508
Silicate soluble dans l'acide chlorhydrique 0,184.	Protoxyde de fer	0,073
	Oxyde de manganèse	0,005
	Alumine soluble	0,034
	Silice gélatineuse	0,072
Résidu insoluble 0,308.	Silice	0,133
	Alumine	0,070
	Protoxyde de fer	0,095
	Oxyde de manganèse	0,010
		1,000

En réunissant la partie soluble et la partie insoluble, on aura :

Fer métallique	0,508	
Silice	0,205	0,106
Alumine	0,104	0,048
Protoxyde de fer	0,168	0,038
Protoxyde de manganèse	0,015	0,003
	1,000	

Le silicate qui accompagne le fer métallique se rapproche beaucoup, par sa composition, d'un silicate de prot-

oxyde de fer et d'alumine fAS^2, préparé par M. Berthier (*Voie sèche*, tome I, page 448), et qui s'est fondu complétement au fourneau à vent. La grande proportion de fer métallique que contient le minerai de Vellexon est évidemment la cause qui a empêché les grains de fondre ou de se souder les uns aux autres. Lorsqu'on rendait le vent au fourneau, après la coulée, la liquation de ce minerai s'opérait rapidement, grâce à la chaux et aux fragments de charbon mélangés, et il se réduisait encore une proportion considérable de protoxyde de fer. On remarquait toutefois que les premiers laitiers qui arrivaient sur la dame, 1^h 30^m environ après la coulée, étaient plus verts et conséquemment plus ferreux que pendant le reste du fondage.

Conclusions.

Les résultats des expériences qui viennent d'être exposées permettent d'apprécier avec un certain degré d'exactitude les circonstances principales de la réduction des minerais, sur toute la hauteur de la cuve du fourneau. Le tableau suivant offre le résumé de ces essais en ce qui concerne le minerai de La Chapelle et celui de Laissey. J'ai rapporté, pour chaque expérience, le poids du minerai à 100 parties de minerai cru. Les résultats fournis par les deux espèces de minerai sont rangés d'une manière synoptique : ils se rapportent à quatre profondeurs différentes au-dessous du gueulard; j'ai calculé les quantités d'eau, d'oxygène et d'acide carbonique perdues par 100 de minerai lorsqu'il arrive aux profondeurs indiquées; sa transformation en fer résulte de la perte de l'oxygène. J'ai donc calculé la quantité d'oxygène abandonnée par le minerai dans quatre des positions qu'il occupe successivement pour arriver au bas de la cuve. Ces éléments réunis m'ont permis de faire entrer dans le tableau qui suit la vitesse de réduction.

			PROFONDEUR.			
			à 2m,50 3e charge.	à 4m,35 6e charge.	à 5m,00 8e charge.	à 5m,70 11e charge.
Minerai de La Chapelle.	100 parties se réduisent à....		89,30	82,31	81,22	72,91
	100 parties ont perdu.	Eau.....	10,40	14,40	15,00	15,00
		Oxygène...	0,30	3,30	3,78	12,09
	100 de peroxyde de fer ont perdu.	Oxygène...	0,48	5,55	6,33	20,16
	Vitesse de réduction moyenne.		0,16	1,69	0,39	4,61
Minerai de Laissey.	100 parties se réduisent à....		93,60	88,79	84,74	68,12
	100 parties ont perdu.	Eau.....	6,40	10,00	10,00	10,00
		Oxygène.....	0,00	1,21	1,66	5,88
		Acide carbonique	0,00	0,00	3,60	16,00
	100 de peroxyde de fer ont perdu.	Oxygène...	0,00	3,34	4,58	16,24
	Vitesse de réduction moyenne.		0,00	1,12	0,62	3,89

Le terme que j'ai appelé *vitesse de réduction* a été calculé, pour chaque expérience, en divisant la quantité d'oxygène cédée par 100 parties de peroxyde de fer, dans l'intervalle compris entre la fin de deux expériences consécutives, par le nombre de charges qui les séparent. Ainsi, pour avoir la vitesse de réduction moyenne du minerai de La Chapelle, quand il occupe la partie du fourneau comprise entre la troisième et la sixième charge, il suffit de réduire la fraction $\frac{5,55 - 0,48}{3} = 1,69$. J'ai cru qu'il était plus conve-

nable de rapporter la vitesse de réduction au nombre de charges, plutôt qu'au temps absolu du séjour du minerai dans le fourneau; en effet, la charge ayant un volume constant, il est clair que le minerai sera toujours à la même hauteur dans le fourneau, pour deux expériences consécutives, lorsqu'il sera recouvert par le même nombre de charges, tandis qu'au contraire, pour des temps égaux, le minerai ne descend pas toujours de la même quantité dans le fourneau, par suite de la vitesse variable du vent.

Le haut fourneau de Clerval contient vingt-cinq charges, c'est-à-dire que le minerai n'arrive à la tuyère qu'après avoir été recouvert par vingt-cinq charges successives. La vitesse moyenne de réduction pour les minerais serait donc $\frac{30,66}{25} = 1,22$.

La comparaison des termes qui représentent les vitesses de réduction permet d'apprécier assez facilement la manière dont marche la réduction des minerais. Ainsi l'on voit que, dans la partie supérieure du fourneau, les minerais en grains ne perdent à peu près que leur eau de combinaison; que leur réduction s'opère ensuite avec une certaine rapidité lorsqu'ils se transforment en oxyde magnétique. La vitesse de réduction paraît diminuer très-sensiblement dans la région du fourneau où s'opère le changement de l'oxyde magnétique en oxyde des battitures, tandis que, dans l'intervalle compris entre la huitième et la onzième charge, la réduction s'effectue avec une grande énergie (1). On observe des résultats analogues aux précédents, relativement au minerai calcaire. La réduction paraît s'opérer ici d'une manière sensiblement plus uniforme que dans le minerai en grains, quoique les mêmes oscillations dans la vitesse de réduction s'y fassent sentir. On peut remarquer aussi qu'à

(1) Il est bon de se rappeler que le peroxyde de fer perd les 0,11 de l'oxygène qu'il renferme en passant à l'état d'oxyde magnétique, et les 0,25 en se transformant en oxyde des battitures.

la même hauteur dans le fourneau, la réduction du peroxyde de fer du minerai calcaire est toujours moins avancée que celle du minerai en grains. Il convient, ce me semble, d'attribuer ces deux résultats au volume relatif des fragments des deux espèces de minerais. Celui de Laissey, étant en morceaux beaucoup plus gros, présente moins de surface sous le même volume que le minerai en grains, et la réduction par cémentation doit se faire nécessairement avec plus de difficulté.

Quoi qu'il en soit, on voit que la réduction s'opère avec lenteur dans la partie supérieure du haut fourneau, puisque le peroxyde de fer perd tout au plus les 0,20 de son oxygène dans l'espace occupé par huit charges consécutives. Au contraire, dans une zone du fourneau très-resserrée en hauteur, et qui se trouve un peu au-dessus du raccordement de la cuve et des étalages, on observe que dans $1^h 30^m$ ou 2 heures au plus, la quantité d'oxygène abandonnée s'élève à près de la moitié de celle renfermée dans le peroxyde de fer.

La cause de cette variation si subite dans la vitesse de réduction des minerais, soit argileux, soit calcaires, me paraît devoir être attribuée au dégagement de l'acide carbonique de la castine et du minerai calcaire. On a pu remarquer que le minerai de Laissey a déjà perdu une petite partie de son acide carbonique dans l'expérience (3). Dans la quatrième, la totalité de la chaux est à l'état caustique. Ainsi le dégagement de l'acide carbonique coïncide d'une manière frappante avec une variation brusque dans la température du haut fourneau et dans la vitesse de réduction des minerais. Ce fait ne présente rien d'étonnant, puisqu'on sait, d'après les expériences de M. Bischoff, que l'acide carbonique absorbe une très-grande quantité de calorique latent pour passer à l'état gazeux. Les gaz qui traversent le haut fourneau doivent donc se dépouiller dans la zone, où s'opère la calcination de la chaux, d'une partie de la cha-

leur sensible qu'ils possèdent, en même temps que leur énergie réductive se trouve diminuée, soit par l'abaissement de la température, soit par le mélange d'une proportion notable d'acide carbonique (1).

Influence des gangues. — On a pu remarquer, dans les résultats des analyses qui précèdent, l'influence que possèdent le mode de combinaison du fer et la nature des matières terreuses qui y sont associées sur la manière d'être du minerai dans le haut fourneau. Voici, je crois, quelles sont les conclusions qu'on peut formuler à ce sujet :

1°. Le minerai en grains de La Chapelle renferme avec l'hydroxyde de fer, de la silice et de l'alumine en proportions telles, qu'en y ajoutant une quantité convenable de chaux on obtiendrait un silicate contenant à peu près 0,50 silice, 0,20 alumine et 0,30 chaux, composition qui correspond à un laitier bien fluide. Ainsi on pourrait, à la rigueur, fondre ce minerai seul, avec addition de castine. La matière terreuse associée à l'hydroxyde de fer est un mélange d'argile et d'hydrate d'alumine, et non de l'argile homogène, puisque la proportion d'alumine soluble est beaucoup plus considérable que celle correspondante à la silice gélatineuse qui provient de l'attaque, par l'acide chlorhydrique, d'une certaine portion de l'argile. Dans les trois premières expériences, il ne paraît pas qu'il y ait eu réaction entre les matières terreuses et l'oxyde de fer, car l'attaque des minerais par l'acide chlorhydrique donne sensiblement les mêmes proportions d'alumine soluble, de silice gélatineuse et d'argile. Mais dans la zone du fourneau qui se trouve entre la huitième et la onzième charge, la

(1) La détermination de l'acide carbonique dégagé ne présente pas de difficultés. Admettons que la quantité d'air introduite dans le fourneau est de 10 mètres cubes par minute ou 13 kilogrammes; si l'on charge tous les trois quarts d'heure, on trouvera facilement, d'après la composition de la charge, que l'acide carbonique abandonné en une minute par le minerai calcaire et la castine équivaut à $0^{k},60 = 0^{m.c},30$, c'est-à-dire à 3 pour 100 du volume total de l'air.

presque totalité de l'argile se combine avec tout le fer qui reste encore à l'état de protoxyde, et forme un silicate fusible dans lequel sont disséminées avec le fer métallique l'argile et l'alumine non attaquées. La fusibilité de ce silicate diminue continuellement, à mesure que la proportion de fer métallique augmente. La réduction du protoxyde de fer devient, d'un autre côté, d'autant plus difficile qu'il en reste moins dans le silicate, à moins qu'une autre base forte ne vienne la favoriser en s'unissant à la silice. Cette dernière condition est réalisée par l'adhérence que contractent les grains de minerai arrivés à l'état pâteux, avec les morceaux de castine ou de minerai calcaire.

Il importe, pour le bon roulement du fourneau, que le silicate formé ne devienne jamais assez fluide pour couler, à travers les charbons, jusque dans l'ouvrage. On atteindra ce but, si le silicate contient déjà, au moment où il se ramollit, assez de fer métallique pour l'empêcher d'entrer en fusion complète. La présence de l'alumine dans le silicate de fer tend à en diminuer la fusibilité : aussi les minerais très-alumineux se réduisent-ils complétement sans changer de forme.

2°. La composition du minerai de Laissey permettait de prévoir la manière dont il se comporterait dans le fourneau; ainsi, il était évident, *à priori*, que la grande quantité de chaux qu'il renferme s'opposerait à sa fusion. On voit d'ailleurs que la proportion de silice gélatineuse a notablement augmenté dans l'expérience (4), où le résidu insoluble dans les acides et la potasse caustique se compose en entier de grains de quartz hyalin, lesquels, comme on sait, n'entrent en combinaison avec la chaux que très-difficilement et sous l'influence d'une température fort élevée.

3°. On a vu (4) que la réduction du silicate de protoxyde de fer, qui forme la base des scories de forges, était à peu près nulle sur toute la hauteur de la cuve. Ce résultat explique parfaitement les effets métallurgiques du traite-

ment des scories de forges dans les hauts fourneaux. On sait que l'emploi de ces scories, et surtout des scories crues, qui sont les plus fusibles, ne peut avoir lieu en proportion un peu considérable dans les charges sans altérer et compromettre le roulement du fourneau; on n'obtient plus que des fontes blanches; les laitiers deviennent très-ferreux, et le fourneau s'élargit dans la partie inférieure avec rapidité. Tous ces effets sont dus évidemment à la fusion des scories avant leur réduction, et à l'arrivée dans l'ouvrage et dans le creuset de matières fondues très-riches encore en oxyde de fer.

Certains minerais, qui paraissent au premier aspect sans analogie avec les scories de forges, s'en rapprochent tout à fait par la manière dont ils se comportent dans le haut fourneau. Les minerais de fer oligiste à gangue quartzeuse sont dans ce cas (1). Leur compacité s'oppose à ce que la réduction par cémentation s'opère facilement dans le haut du fourneau. Lorsque la température augmente, la transformation en protoxyde s'effectue rapidement sous l'influence de la silice, et le silicate formé produit dès lors les mêmes effets qu'une scorie de forges. On doit donc, pour en tirer un parti avantageux, traiter ces minerais par les mêmes

(1) Je citerai, par exemple, le minerai de Servance (Haute-Saône) qui forme un filon puissant dans le terrain porphyrique de cette localité, et qui se compose de fer oligiste micacé mélangé de grains quartzeux et de quelques nids de baryte sulfatée. Ce minerai renferme moyennement 50 pour 100 de fer. On a essayé, à plusieurs reprises, de l'employer au fourneau du Magny. On le jetait dans le fourneau en assez gros fragments, et il y produisait exactement les mêmes résultats que des scories de forges. Ces essais ont été recommencés dernièrement à l'usine de Ronchamp. On grillait le minerai, je ne sais trop pourquoi, avant de l'employer, dans un four semblable aux fours à chaux continus, qui recevait des lits alternatifs de minerai en gros fragments, et de menu coke ou escarbilles. Il est arrivé assez souvent pendant ce grillage, qui n'était autre chose qu'un commencement de réduction, que le minerai coulait par la partie basse du four. Les fragments retirés du four, qui ne sont pas entrés en fusion complète, présentent cependant, dans leur cassure, le même aspect qu'une scorie de forges, et j'y ai remarqué beaucoup de cristaux de la forme du péridot.

procédés. Il est probable qu'on parviendra, sans trop de difficulté, à fondre une certaine proportion de scories en les employant en très-petits fragments, afin qu'elles présentent le plus de surface possible sous le même volume, et qu'elles puissent se mélanger facilement avec les autres minerais. Mais il sera sans doute beaucoup plus avantageux de les utiliser en les moulant en briquettes avec de la chaux et du charbon, et en formant ainsi des minerais qui se réduisent, comme on l'a vu plus haut, tout aussi facilement que les meilleurs minerais en grains, et qui ont même sur ceux-ci l'avantage de l'infusibilité.

Influence du combustible. — Il est permis de penser que l'emploi d'un autre combustible que le charbon de meule produirait des différences appréciables dans la manière d'être des différents minerais. Je ferai, à ce sujet, quelques réflexions. Il est à peu près démontré que l'emploi d'une forte proportion de bois en nature a pour résultat de déterminer, dans une certaine zone du fourneau très-resserrée en hauteur, un changement de température tellement brusque, qu'elle varie du rouge-cerise à 100 ou 120 degrés dans un espace de $0^m,70$, ou 1 mètre de hauteur. Ce refroidissement est dû à l'absorption de chaleur latente par les produits de la distillation du bois, distillation qui détermine, dans la température du courant d'air qui traverse le fourneau, des effets comparables à ceux que produit la transformation du carbonate de chaux en chaux caustique. Dans un fourneau au bois, l'hydroxyde de fer ne commence à perdre son eau que dans l'espace où le bois se distille, et il y a tout lieu de croire que la hauteur de la zone comprise entre ce point et celui où s'opère la calcination de la chaux et la transformation de l'oxyde de fer en fer métallique est beaucoup moins grande que dans un fourneau au charbon de bois. Cette circonstance, qui favorise la formation d'un silicate de fer fusible, tend à diminuer le rendement des minerais. Les résultats de l'emploi du bois en

grande proportion dans les hauts fourneaux ont présenté et présentent encore des divergences fort remarquables, et qui sont évidemment en rapport avec la composition des minerais qu'on y traite. La nature du charbon que produit la distillation du bois est une cause générale qui agit toujours dans le même sens. Les scories de forges, les battitures, les minerais d'oxyde magnétique ou de peroxyde anhydre, qui n'éprouvent sur toute la hauteur de la cuve que des changements peu importants, et les minerais calcaires, dont la réduction complète s'opérera toujours avant la fusion, se comporteront peut-être dans un fourneau au bois comme s'il marchait au charbon seul; mais on conçoit qu'il pourra n'en être pas de même pour les hydroxydes à gangue argileuse. Je ne présente ces réflexions que pour faire remarquer combien est délicate l'appréciation des causes qui font varier, d'une usine à l'autre, les avantages de l'emploi du bois en nature.

Je terminerai cet essai par quelques observations générales sur le procédé actuel de fusion des minerais dans les hauts fourneaux.

On peut comparer ce qui se passe dans ces appareils avec les phénomènes que présente l'élaboration des minerais par la méthode catalane, et qui ont été décrits avec tant de précision par M. François. On voit se reproduire, au contrevent du foyer catalan, les mêmes circonstances de vaporisation de l'eau, de réduction et de scorification que j'ai signalées du haut en bas de la cuve du fourneau. Dans le procédé catalan, le noyau métallique se forme au milieu d'une masse de scories chargées de protoxyde de fer, et cette circonstance s'oppose à la cémentation du métal. Dans le haut fourneau, au contraire, le silicate de fer, qui s'est ramolli dans une certaine région de l'appareil, est décomposé à peu près complétement sous l'influence de la chaux et du charbon, et le fer réduit, ne se trouvant plus en contact qu'avec un silicate terreux, doit se carburer avec faci-

lité. L'emploi de l'oxyde de manganèse dans le procédé catalan, qui permet d'obtenir des aciers naturels par la substitution de cet oxyde dans les scories au protoxyde de fer, forme la transition entre les deux procédés.

L'imperfection inhérente au procédé actuel des hauts fourneaux consiste dans le mélange de combustible et de minerai. Les gaz fortement échauffés et réductifs qui proviennent des parties inférieures du fourneau devraient perdre tout à la fois, en s'élevant, leur chaleur propre et leurs principes réductifs, de manière à être froids et complétement brûlés à leur sortie de l'appareil. L'hydroxyde de fer perd son eau à une température assez basse. D'un autre côté, le peroxyde de fer se transforme en oxyde magnétique avec la plus grande facilité, et pourrait, par conséquent, dépouiller les gaz échauffés de leurs dernières parties combustibles. Mais en passant à travers un mélange de charbon et de minerai, les gaz dissolvent à la fois de l'oxygène et du carbone, de façon qu'ils sont peut-être aussi riches en parties combustibles, en sortant du gueulard, qu'ils le sont à la base de la cuve. La valeur calorifique que ces gaz peuvent développer par leur combustion représente encore, dans les fourneaux dont l'allure est la plus économique, les 60 pour 100 de la chaleur totale que peut donner le charbon. Cette considération a déjà déterminé plusieurs métallurgistes à proposer la substitution d'autres appareils de fondage aux hauts fourneaux actuels. La compagnie des usines d'Audincourt a fait, il y quinze mois environ, l'essai d'un appareil imaginé par M. Page, directeur du haut fourneau de Pon-de-Roide, et qui était destiné à fondre les minerais de fer. Il se composait de deux parties distinctes : l'une, formée de deux troncs de cône accolés base à base à peu près comme les hauts fourneaux actuels, recevait les minerais qu'on chargeait par la partie supérieure avec une faible proportion de charbon de bois. La colonne de minerai se terminait sur une sole peu étendue servant de creuset et

précédée d'une grille que l'on maintenait constamment chargée de houille, et qui était traversée par un courant d'air forcé. On voit que, dans cette disposition, le combustible était à peu près isolé du minerai, et que le haut fourneau servait de cheminée aux produits de la combustion. Ces essais ont été abandonnés, parce que la réduction des minerais était loin d'être complète. On obtenait des laitiers très-chargés de fer, et une quantité variable d'un métal fondu, assez analogue à l'acier de forge. Ces faits pouvaient être prévus, car il était évident que cet appareil n'offrait pas aux minerais les mêmes facilités de réduction qu'un haut fourneau ordinaire. Avec des minerais préparés artificiellement, de telle sorte que leur fusion ne pût s'opérer que sous l'influence d'une température fort élevée, c'est-à-dire en mêlant les minerais argileux avec la quantité de chaux convenable pour la fusion de l'argile, et une certaine quantité de charbon, on serait peut-être parvenu à des résultats plus satisfaisants. Le procédé de M. Page me paraît fondé sur des idées théoriques exactes, et il ne serait pas sans intérêt de recommencer quelques essais dans cette direction. Au reste, je n'indique ces modifications qu'avec la plus grande réserve, et seulement comme des conséquences assez logiques de faits démontrés. C'est, en définitive, à la pratique à les faire admettre ou à les faire rejeter.

IV.

Recherches sur la composition des gaz des hauts fourneaux, et sur le parti qu'on en peut tirer comme combustible (1). (Premier Mémoire.)

L'emploi, comme combustible, des flammes qui se dégagent des hauts fourneaux et des autres foyers destinés au

(1) A l'époque où les expériences qui font l'objet de ce Mémoire ont été

travail du fer, est un des perfectionnements les plus importants que la métallurgie ait réalisés depuis plusieurs années. Dès 1814, M. Berthier en avait signalé toute l'importance dans le *Journal des Mines*, et l'on peut affirmer que cette innovation a facilité tous les autres progrès obtenus dans l'art des forges depuis cette époque. Il me suffira de rappeler que c'est seulement en utilisant les flammes perdues, qu'on est parvenu à introduire dans la plupart de nos hauts fourneaux l'emploi de l'air chaud et du bois desséché ou torréfié au lieu de charbon. On s'est aperçu, il y a quelques années, que la flamme du gueulard était plus que suffisante pour fournir, par l'intermédiaire d'une chaudière à vapeur, la force motrice nécessaire au roulement d'un haut fourneau, et cette importante amélioration, qui dispensera le maître de forges de l'usage d'un cours d'eau, permettra d'établir les usines dans les localités les plus favorables aux approvisionnements en bois et en minerais. Enfin, on est parvenu, dans ces derniers temps, à utiliser les gaz combustibles pour refondre la fonte et même pour le soudage du fer, ainsi qu'il résulte des essais dont il a été rendu compte succinctement dans le tome XIV des *Annales des Mines*, page 349.

---

entreprises, j'ignorais que M. Bunsen se fût occupé du même sujet, en analysant les gaz pris à différentes profondeurs dans le haut fourneau de Veckerhagen. Après avoir pris communication des résultats obtenus par ce chimiste, je me suis décidé à publier ces premiers essais par les considérations suivantes : les procédés que j'ai employés sont tout à fait différents de ceux de M. Bunsen, et présentent, je crois, au moins autant de garanties d'exactitude; en second lieu, les résultats des analyses sont loin d'être les mêmes, ce qui tient sans doute à la différence que présentent les roulements des fourneaux de Veckerhagen et de Clerval. Enfin, si le procédé que j'ai suivi ne m'a pas permis de déterminer séparément la proportion d'hydrogène et celle d'hydrogène protocarboné, les analyses eudiométriques de M. Bunsen ont été faites sur des gaz dépouillés de vapeur d'eau, corps qui n'a point été dosé. J'ai pensé d'ailleurs que la publication de nombreuses analyses de gaz de hauts fourneaux dans des circonstances variables de roulement était un des meilleurs moyens d'éclaircir ce qu'il peut y avoir d'obscur encore dans leur théorie.

M. Robin, à qui l'on doit ces derniers essais, a cherché à apprécier la valeur calorifique des gaz qui se dégagent du haut fourneau de Niederbronn par deux procédés : l'un qui consistait à mesurer la quantité de vapeur produite sous une tension connue, dans un temps donné, et l'autre, où l'on mesurait la température et le volume de l'eau de condensation. M. Robin est parvenu à ce résultat, que la flamme perdue du haut fourneau de Niederbronn représentait les 54,9 pour 100 de la valeur calorifique du charbon introduit dans le fourneau, et une force de 26,6 chevaux-vapeur.

L'analyse chimique de ces gaz devait donner la facilité d'apprécier, avec un certain degré d'exactitude, la quantité de chaleur absolue développée par leur combustion, ainsi que la limite supérieure de la température qu'elle permet d'atteindre. M. le conseiller d'État directeur général des Ponts et Chaussées et des Mines a jugé convenable de faire exécuter ce travail, et il a bien voulu me le confier. Ce Mémoire renferme la première partie des recherches que nécessite son accomplissement.

Ces premières expériences ont été faites sur les gaz du haut fourneau de Clerval (Doubs), pendant le mois de juin 1839. Je dois exprimer ici à MM. Bouchot frères, propriétaires de cette usine, et en particulier à M. Auguste Bouchot, qui y réside, tous mes remercîments pour l'extrême complaisance dont ils ont usé à mon égard.

Composition des gaz qui s'échappent des hauts fourneaux.

Avant d'indiquer les procédés que j'ai suivis et les résultats obtenus, je dois signaler avec soin les principales circonstances que présentait à cette époque le roulement du haut fourneau, car la composition des gaz est nécessairement en rapport avec elles.

Le haut fourneau, mis en feu à la fin d'avril 1839, présente les dimensions suivantes :

	m
Diamètre du gueulard	0,66
Diamètre au ventre	2,16
Hauteur de la cuve	5,66
Hauteur des étalages	2,12
Diamètre de l'ouvrage au raccordement avec les étalages	0,72
Hauteur de l'ouvrage	0,44
Largeur devant la tuyère	0,61
Hauteur du creuset	0,44
Hauteur totale du fourneau	8,66

Les mesures en usage dans l'usine sont :

Pour le charbon, le cuveau = 5 rasses = $\frac{1}{2}$ mètre cube; le charbon de meule se compose de 0,66 environ d'essences chêne, hêtre et charme, et 0,33 bois blanc. J'ai trouvé 116 kilogrammes pour le poids du cuveau de charbon, soit 232 kilogrammes le mètre cube.

Pour les minerais, la mesure employée est la conge = $\frac{1}{12}$ cuveau = $\frac{1}{2}$ pied cube métrique.

Les minerais employés sont des mines en grains argileuses de diverses localités. Le minerai de La Chapelle-Saint-Quillain (Haute-Saône) entre pour moitié dans le mélange des mines en grains. On y joute du minerai calcaire en roche, provenant de la mine de Laissey (Doubs).

Pendant mon séjour à l'usine, la charge a été presque constamment composée de :

Minerais en grains	6	conges,	pesant	201 kilog.
Minerai de Laissey	4	—	—	130
Battitures et paille de fer	$\frac{1}{4}$	—	—	11
Castine	$\frac{1}{4}$	—	—	7
Charbon	1	cuveau,	—	116

La charge ainsi composée produit 95 kilogrammes de fonte grise employée à fabriquer des moulages en première

fusion. On passe moyennement 30 à 32 charges en 24 heures, ce qui donne un produit de 3,000 kilogrammes environ par jour. Il en résulte que les minerais rendent en moyenne 27,8 pour 100, et que l'on consomme 122 de charbon pour 100 de fonte.

Le lit de fusion renferme :

Fer métallique....		0,287
Matières volatiles 0,330.	Oxygène.....	0,125
	Eau.....	0,128
	Acide carbonique.....	0,077
Matières terreuses 0,383.	Silice.....	0,202
	Alumine.....	0,076
	Chaux.....	0,098
	Oxyde de manganèse.....	0,007
		1,000

1 de charbon fond 3 fois son poids de minerai et de castine.

Essai des charbons.

J'ai déterminé la composition de deux espèces de charbon de meule provenant des essences chêne et tremble, en les analysant au moyen de l'oxyde de cuivre et du chlorate de potasse. L'oxygène qu'on fait dégager à la fin de l'opération sert à brûler les parcelles de charbon qui ont échappé à l'action de l'oxyde de cuivre. Les charbons analysés avaient été préalablement desséchés dans un courant d'air sec à la température de 140 à 150 degrés : la poussière était pesée dans un tube fermé à l'abri du contact de l'air. Enfin, le tube à combustion rempli du mélange était desséché avec soin dans le vide sec à la température de 120 degrés environ, au moyen de la petite pompe pneumatique de M. Gay-Lussac.

Charbon de jeune chêne. — Des fragments de ce charbon, après avoir été exposés longtemps à l'air, ont été desséchés dans un courant d'air sec, à une température de 140 ou

150 degrés. Au bout d'une heure et demie, j'ai trouvé qu'ils avaient perdu exactement 6 pour 100 de leur poids.

I. 1gr,272 ont donné 0,039 de cendres grisâtres. L'incinération a été faite au rouge, de sorte que la chaux se trouve dans les cendres à l'état de carbonate. La proportion des principes volatils obtenue par l'analyse immédiate est donc un peu trop forte.

II. On a fait deux dosages de l'hydrogène et du carbone par l'oxyde de cuivre.

1°. 0gr,501 ont donné 0gr,127 d'eau et 1gr,591 d'acide carbonique.

2°. 0,408 ont donné 0,105 d'eau et 1,292 d'acide carbonique.

D'où l'on tire pour la composition du charbon.

	I.	II.	Moyenne.
Hydrogène	2,81	2,85	2,83
Carbone	87,80	87,56	87,68
Oxygène	6,33	6,53	6,43
Cendres	3,06	3,06	3,06
	100,00	100,00	100,00

ou, déduction faite des cendres,

Hydrogène	2,91
Carbone	90,46
Oxygène	6,63
	100,00

III. Deux fragments du même charbon, desséchés comme je l'ai indiqué tout à l'heure, et pesant 6gr,12 calcinés au blanc dans un double creuset et avec les précautions d'usage, pesaient 5gr,32; d'où

Matières volatiles	13,06
Charbon	83,88
Cendres	3,06
	100,00

En admettant que le charbon ainsi calciné ne renferme

plus qu'une trace d'hydrogène, on trouve que les 13,06 de matières volatiles doivent se composer de :

Oxygène	6,43	49,7
Hydrogène	2,83	21,6
Carbone	3,80	28,7
	13,06	100,0

Charbon de tremble. — Ce charbon est très-léger ; sa couleur est d'un noir mat. En l'examinant à la loupe, on voit qu'il est criblé de petites cavités ou pores, disposées dans le sens des fibres du bois. Il perd par dessiccation à 140 degrés les 0,052 de son poids.

I. 1,053 ont donné 0,009 de cendres très-blanches et très-légères.

II. On a fait deux dosages de l'hydrogène par l'oxyde de cuivre.

0gr,270 ont donné 0,078 d'eau et 0,852 d'acide carbonique.

On tire de là, pour la composition du charbon :

Hydrogène	3,20
Carbone	87,22
Oxygène	8,72
Cendres	0,86
	100,00

ou, déduction faite des cendres,

Hydrogène	3,22
Carbone	87,98
Oxygène	8,80
	100,00

III. 5gr,33 bien desséchés et calcinés en vase clos à la chaleur blanche ont perdu 0gr,91, d'où l'on tire :

Matières volatiles	17,07
Charbon	82,01
Cendres	0,86
	100,00

Les 17,07 de matières volatiles renferment :

Hydrogène.....	3,20	18,7
Oxygène.....	8,72	51,2
Carbone.....	5,15	30,1
	17,07	100,0

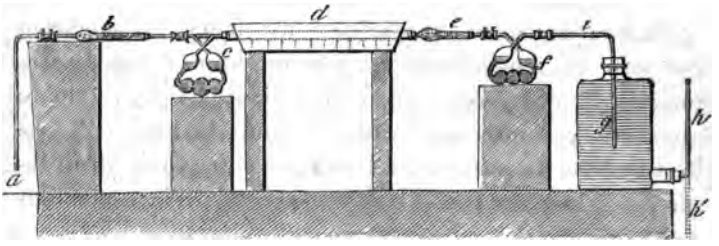
Le haut fourneau marche au vent chaud. La soufflerie est mise en mouvement par une machine à vapeur alimentée par deux chaudières, dont l'une est placée sur le gueulard, et l'autre sur le sol de l'usine. La buse a $0^m,072$ de diamètre. La pression de l'air varie entre 15 et 38 millimètres de mercure par suite de l'inégalité dans la production de la vapeur.

Description de l'appareil employé dans l'analyse.

Dans toutes les expériences qui vont suivre, la détermination des gaz, à l'exception de l'azote, a été faite par des pesées. Après l'absorption de la vapeur d'eau et de l'acide carbonique par le chlorure de calcium et la potasse, les gaz étaient brûlés par leur passage à travers un tube rempli d'oxyde de cuivre. L'eau et l'acide carbonique résultant de cette combustion étaient condensés par le chlorure de calcium et la potasse.

L'appareil, représenté ci-dessous, se compose : 1° d'un tube étroit *a*, recourbé à angle droit, et plongeant dans le gueulard de $0^m,25$ environ ; 2° d'un tube *b* rempli de chlorure de calcium, et lié au précédent à l'aide d'un tuyau en caoutchouc ; 3° d'un appareil condenseur *c*, renfermant une dissolution de potasse caustique à 43 degrés Beaumé ; il est lié au précédent par un tube en caoutchouc ; 4° d'un tube *d* en verre vert ou en porcelaine rempli d'oxyde de cuivre, et placé sur un fourneau en tôle de $0^m,35$ de longueur, analogue à ceux dont on se sert pour les analyses organiques, ce tube reçoit d'un côté l'une des branches du condenseur *c* ;

5° d'un appareil de chlorure de calcium *e* qui s'ajuste au tube à combustion par un bouchon; 6° d'un condenseur à potasse *f*; 7° celui-ci se raccorde avec un tube recourbé à angle droit *i*, qui vient plonger jusqu'à une petite distance du fond dans un flacon *g* rempli d'eau, de quelques litres de



capacité. Ce flacon est muni d'une tubulure latérale, placée à quelques centimètres du fond, et qui reçoit un bouchon portant un tube *h* recourbé à angle droit et effilé à son extrémité supérieure. Dans la position où le représente la figure, l'eau se tient au même niveau dans le flacon *g* et dans le tube *h*; mais en faisant tourner celui-ci dans le bouchon qu'il traverse, de manière à ce qu'il prenne la position *h'*, on voit que, si la différence de niveau entre l'extrémité du tube *h'* et celle du tube *i* est assez considérable pour faire équilibre à la somme des hauteurs de la potasse déplacée dans les condenseurs *c* et *f*, le gaz, aspiré dans le fourneau par l'extrémité du tube *a*, traversera successivement tous les appareils, et se rassemblera à l'extrémité supérieure de la bouteille *g*, après s'être dépouillé de la vapeur d'eau, de l'acide carbonique et des gaz combustibles qu'il renfermait. Il suffira donc de mesurer le gaz qui arrive dans la bouteille pour avoir la proportion de gaz azote. Le volume de ce gaz est le même que le volume de l'eau qui s'écoule par le tube *h'*; mais pour obtenir le volume de ce gaz, sec et à la pression $0^m,760$, il faut tenir compte de la différence entre le niveau de l'eau dans le flacon *g* à la fin de l'expérience et

l'extrémité du tube h' (1), et de la tension maximum de la vapeur d'eau à la température à laquelle on opère.

L'oxyde de cuivre que j'ai employé était un mélange à parties égales d'oxyde provenant de la calcination du nitrate et de planures grillées. L'emploi d'un tube en porcelaine est préférable à celui d'un tube en verre vert. Le gaz que renferme le tube *d* quand l'opération marche ayant une tension inférieure à la pression atmosphérique, il en résulte que le tube en verre, lorsqu'il est un peu ramolli, s'affaisse et se plisse longitudinalement, en comprimant la colonne d'oxyde, ce qui a rendu quelquefois le passage des gaz très-difficile.

Avant d'ajuster les différentes pièces de l'appareil, il faut commencer par dessécher complétement l'oxyde de cuivre. On y parvient en chauffant le tube *d* et en aspirant avec la bouche par l'une des extrémités, tandis qu'à l'autre est adapté un tube à chlorure de calcium pour dessécher l'air qui traverse la colonne chaude d'oxyde de cuivre. On met ensuite en place les quatre appareils *b*, *c*, *e*, *f* qu'on a pesés à la balance au milligramme; on fait plonger le tube *a* dans le fourneau, et l'on commence l'opération en renversant le tube *h* de la quantité nécessaire pour obtenir un courant de gaz lent et régulier. On peut s'arranger de façon à recueillir un litre d'eau dans $\frac{3}{4}$ d'heure ou une heure. Lorsqu'on juge que la quantité de gaz qui a traversé l'appareil est suffisante, on soulève le tube *a* pour le retirer du fourneau, on ajuste à son extrémité un tube renfermant du chlorure de calcium, et l'on continue à aspirer de l'air sec pour balayer tout l'appareil; mais on a soin de ne pas

(1) La vitesse d'écoulement de l'eau par le tube h' est déterminée par la différence de niveau entre les extrémités inférieures des tubes *i* et h', et cette vitesse doit rester constante, tant que le tube h' reste dans la même position. La force élastique du gaz, qui se rassemble au haut de la bouteille, varie du commencement à la fin de l'opération, et diffère à chaque instant de celle de l'air extérieur de toute la hauteur de colonne d'eau comprise entre le niveau dans la bouteille et l'extrémité du tube h'.

recevoir l'eau qui s'écoule avec celle qu'on a recueillie dans la première période de l'opération. Celle-ci représente bien le volume total du gaz azote; car, si l'on a commencé à la recevoir lorsque l'appareil était encore rempli d'air, ce qui donne une erreur en plus, on a cessé de la recueillir au moment où le tube d'aspiration n'a plus plongé dans le fourneau, quand l'appareil était encore rempli de gaz. Cette compensation est à très-peu près exacte.

Il arrive assez ordinairement qu'une partie de la vapeur d'eau se condense dans le tube *a*. Il faut, pendant qu'on aspire l'air sec à la fin de l'opération, placer quelques charbons sur toute sa longueur pour forcer la vapeur d'eau à passer dans le tube *b*.

La différence entre les poids des quatre appareils *b*, *c*, *e*, *f*, avant et après l'opération, permet de calculer la composition du gaz. Les deux premiers donnent le poids de la vapeur d'eau et de l'acide carbonique. Mais les appareils *e* et *f* représentent seulement l'hydrogène et le carbone que contiennent les gaz combustibles, et il est nécessaire de faire une supposition qui permette de calculer le volume des gaz auxquels ils correspondent. J'ai supposé, dans toutes les expériences qui suivent, que l'hydrogène se trouvait à l'état d'hydrogène protocarboné dans le mélange gazeux. Il est extrêmement probable qu'une partie notable de ce gaz y existe à l'état libre, et même que le mélange gazeux renferme quelques parties de gaz hydrogénés combustibles autres que l'hydrogène et l'hydrogène carboné, comme les substances volatiles que donne le charbon de meule à la distillation. Au reste, la proportion d'hydrogène protocarboné étant toujours comprise entre 3 et 4 pour 100 du volume du gaz, la détermination relative des deux gaz ne présente pas beaucoup d'importance, et l'on verra, par les nombres rapportés ci-après, qu'elle est à peu près indifférente quant à l'appréciation de la quantité de chaleur et de la température développées par la combustion.

Pour parvenir, au moyen de l'appareil décrit tout à l'heure, à déterminer exactement les trois gaz, hydrogène, hydrogène protocarboné et oxyde de carbone, il faudrait pouvoir doser la quantité d'oxygène qu'ils ont absorbée pour se transformer en eau et en acide carbonique. Cette quantité serait représentée exactement par la différence de poids du tube à combustion avant et après l'opération, si l'on pouvait remplir tout l'appareil de gaz azote avant de la commencer et en la terminant. On parviendra à ce résultat, je pense, par la disposition suivante qui n'aura que l'inconvénient de compliquer davantage un appareil dont le maniement offre déjà quelque difficulté, surtout quand on opère sur la plate-forme du gueulard d'un haut fourneau Au lieu de faire communiquer directement le tube *a*, avec l'appareil à chlorure de calcium *b*, on intercalerait entre ces deux tubes un tube à trois pointes, semblable à ceux qu'on emploie dans l'analyse des substances organiques azotées. La troisième pointe perpendiculaire à la ligne *ab* recevrait l'azote. Pour obtenir ce gaz à volonté, il suffira de placer dans le fourneau un second tube d'aspiration, à la suite duquel se trouvera un tube en porcelaine rempli d'oxyde de cuivre pour brûler le gaz; l'eau et l'acide carbonique seront absorbés dans un long tube rempli de potasse caustique qui communiquera avec le tube à trois pointes. Deux petits robinets en cuivre placés, l'un entre le tube *a* et le tube à trois pointes, l'autre entre celui-ci et la source de gaz azote, permettront d'introduire à volonté dans l'appareil, soit le gaz du fourneau, soit l'azote. On pourrait d'ailleurs, sans inconvénient, réduire la longueur du tube à combustion à $0^m,20$; car j'ai remarqué qu'il ne renfermait jamais de cuivre métallique à plus de 6 à 7 centimètres de son extrémité antérieure. Le poids de ce tube rempli d'oxyde de cuivre ne dépasserait pas 70 ou 80 grammes, et l'on pourrait par conséquent, avec une bonne balance, apprécier l'oxygène absorbé à 1 milligramme près.

Recherches de l'oxygène dans les gaz. — J'ai fait plusieurs expériences pour rechercher l'oxygène libre dans les gaz du haut fourneau. Pour les recueillir, j'employais un appareil d'aspiration dans lequel le tube *a* communiquait directement avec le tube *i*. La bouteille étant exactement remplie d'eau, on commençait par y introduire 100 ou 200 centimètres cubes de gaz pour chasser tout l'air des tubes, puis on ouvrait la bouteille, on la remplissait de nouveau, et l'on recommençait l'aspiration. Le gaz aspiré était transvasé dans une éprouvette. Après avoir absorbé l'acide carbonique par la potasse, j'ai essayé le gaz par le phosphore; j'ai toujours obtenu des vapeurs blanches sensibles; mais la diminution de volume n'a jamais dépassé 0,25 ou 0,33 pour 100; elle a été même, dans quelques expériences, tout à fait inappréciable. On doit donc en conclure que les gaz ne renferment plus d'oxygène libre, et que la faible proportion accusée par le phosphore dans quelques expériences, provient de l'air dissous dans l'eau et qui a été déplacé pendant l'opération, soit par l'acide carbonique, soit par la potasse caustique.

Expérience N° 1.

L'opération a duré $1^h 45^m$, on a chargé trois fois dans l'intervalle; on a obtenu les nombres suivants :

	gr
Vapeur d'eau	0,440
Acide carbonique	1,115
Produits de la combustion. Eau	0,263
Produits de la combustion. Acide carbonique	1,748
Volume de l'eau écoulée	3^{lit},120
Différence entre le niveau de l'eau dans la bouteille et l'extrémité du tube *h'*	0^m,30
Température	23°
Baromètre	0^m,744
Volume du gaz supposé sec, ramené à zéro et à 0^m,760	2^{lit},658

Ces nombres donnent, pour la composition du gaz en volumes (1) :

Vapeur d'eau	0,117
Acide carbonique	0,121
Hydrogène protocarboné	0,035
Oxyde de carbone	0,155
Azote	0,572
	1,000
Température du vent	195°
Pression du vent au manomètre à mercure	$0^m,030$

Expérience N° 2.

L'opération a duré $1^h\ 15^m$; on a chargé deux fois dans cet intervalle. Voici les nombres obtenus :

---

(1) Pour calculer la composition du gaz au moyen des nombres obtenus dans l'expérience, on part des données suivantes :

1 d'eau, provenant de la combustion, correspond à 0,451 d'oxygène protocarboné, et à 0,340 de carbone.

1 d'acide carbonique renferme 0,2765 de carbone.

1 de carbone correspond à 2,307 d'oxyde de carbone.

Ayant déterminé, au moyen de ces nombres, le poids de chacun des gaz, on arrive à obtenir leur volume, en se rappelant que :

1 litre de vapeur d'eau pèse	0,807
1 litre d'acide carbonique	1,980
1 litre d'hydrogène protocarboné	0,722
1 litre d'oxyde de carbone	1,257

Pour avoir le volume du gaz azote ramené à l'état sec, à zéro, et à la pression de $0^m,760$, on emploie la formule

$$x = \frac{q\,(H - h)}{760 \times (1 + 0{,}00375\,t)},$$

dans laquelle q représente le volume de l'eau écoulée,

H la pression barométrique du lieu et de l'instant de l'expérience,

h la valeur en millimètres de mercure de la différence de niveau entre l'eau dans la bouteille et l'extrémité du tube d'écoulement, plus la tension maximum de la vapeur d'eau à la température à laquelle on opère,

t la température de l'air à la fin de l'opération.

		gr
Eau		0,265
Acide carbonique		0,679
Produits de la combustion.	Eau	0,174
	Acide carbonique	1,093
Volume de l'eau écoulée		1^{lit},828
Différence de niveau		0^{m},33
Température		25°
Baromètre		0^{m},745
Volume du gaz sec, ramené à zéro et à la pression de 0^{m},760		1^{lit},540

On tire de là :

Vapeur d'eau	0,118
Acide carbonique	0,123
Hydrogène carboné	0,038
Oxyde de carbone	0,160
Azote	0,561
	1,000
Température du vent	205°
Pression au manomètre	0^{m},018

Expérience N° 3.

L'opération a duré 1^{h} 15^{m}. On a obtenu :

		gr
Eau		0,177
Acide carbonique		0,480
Produits de la combustion.	Eau	0,112
	Acide carbonique	0,715
		lit.
Volume de l'eau écoulée		1,250
Gaz azote sec, ramené à zéro et à 0^{m},760		1,064

On tire de là :

Vapeur d'eau	0,116
Acide carbonique	0,128
Hydrogène carboné	0,037
Oxyde de carbone	0,155
Azote	0,564
	1,000
Température du vent	190°
Pression de l'orifice de buse	0^{m},028

Expérience N° 4.

L'opération a duré 1h 15. On a obtenu :

		gr
Eau		0,172
Acide carbonique		0,445
Produits de la combustion.	Eau	0,097
	Acide carbonique	0,660
		lit.
Volume de l'eau écoulée		1,211
Volume du gaz azote sec, ramené à zéro et à 0m,760		1,021

On tire de là :

Vapeur d'eau	0,118
Acide carbonique	0,127
Hydrogène carboné	0,034
Oxyde de carbone	0,152
Azote	0,569
	1,000
Température du vent	190°
Pression au manomètre	0m,035

Les quatre expériences qui précèdent ont été faites avec la même allure du fourneau. La fonte était grise et de bonne qualité pour le travail de la sablerie. Il existe peu de différence entre les résultats de ces analyses : on peut remarquer seulement que la proportion des gaz combustibles paraît augmenter légèrement lorsque la pression du vent diminue. Ainsi, dans l'expérience n° 4, la proportion de l'oxyde de carbone et d'hydrogène carboné est sensiblement moindre que dans l'analyse n° 2 qui correspond à une pression manométrique de moitié environ plus faible. Ce fait peut se concevoir facilement, car la pression et le volume de l'air lancé étant moindres dans un cas que dans l'autre, les gaz séjournent plus longtemps dans le fourneau, et peuvent s'y charger d'une plus grande proportion de charbon; il est également d'accord avec les résultats des roulements des hauts fourneaux, qui prouvent que la consommation de combustible, rapportée à la fonte obtenue,

augmente quand la vitesse du vent diminue. On remarq aussi que la quantité d'azote augmente sensiblement qu la proportion d'oxyde de carbone diminue, et que d'acide carbonique augmente; et cela doit être, puis l'azote doit varier dans le même sens que l'oxygène coml dans le gaz.

Dans les deux expériences suivantes, le charbon de h avait été remplacé par du charbon nouveau de vieux ch On avait diminué la charge en minerai de $\frac{1}{2}$ conge, 5 pour 100.

Expérience N° 5.

On a obtenu les nombres suivants :

		gr
Eau		0,166
Acide carbonique		0,398
Produits de la combustion.	Eau	0,120
	Acide carbonique	0,784
		lit
Volume de l'eau écoulée		1,248
Azote sec, ramené à zéro et à $0^m,760$.		1,042

Ces nombres donnent :

Vapeur d'eau	0,110
Acide carbonique	0,109
Hydrogène carboné	0,040
Oxyde de carbone	0,177
Azote	0,563
	1,000
Température du vent	215°
Pression au manomètre	$0^m,038$

Expérience N° 6.

On a obtenu les nombres suivants :

		gr
Eau		0,184
Acide carbonique		0,452
Produits de la combustion.	Eau	0,145
	Acide carbonique	0,920
		lit
Volume de l'eau écoulée		1,393
Gaz azote sec, ramené à zéro et à $0^m,760$		1,180

Ces nombres donnent pour la composition du gaz :

Vapeur d'eau	0,108
Acide carbonique	0,108
Hydrogène carboné	0,042
Oxyde de carbone	0,179
Azote	0,562
	1,000
Pression au manomètre	0^m,038
Température du vent	210°

Le soir du même jour, la température du vent atteint 220 degrés; la flamme du gueulard devient intense et brillante.

Ces deux analyses sont d'accord avec les résultats qu'on attribue à l'emploi du charbon nouveau : on admet que le charbon sortant des meules porte moins de minerai et donne plus de chaleur au gueulard que celui qui a séjourné quelques mois dans les halles. On peut remarquer aussi que la quantité de vapeur d'eau a sensiblement diminué. Le charbon nouvellement préparé paraît plus facilement soluble dans l'acide carbonique que le charbon ancien, et ce fait, bien que très-remarquable, n'est pas sans analogie avec beaucoup d'autres réactions chimiques.

On a recommencé à employer du charbon vieux, et la composition des gaz est redevenue ce qu'elle était auparavant, comme le prouvent les analyses (7) et (8).

Expérience N° 7.

L'aspiration a duré $1^h 30^m$; l'analyse a donné les nombres suivants :

		gr
Eau		0,209
Acide carbonique		0,567
Produits de la combustion.	Eau	0,142
	Acide carbonique	0,869
		lit
Volume de l'eau écoulée		1,610
Gaz azote sec, ramené à zéro et à 0^m,760		1,336

On tire de là :

Vapeur d'eau	0,112
Acide carbonique	0,124
Hydrogène carboné	0,038
Oxyde de carbone	0,152
Azote	0,574
	1,000
Pression au manomètre	0^m,036
Température du vent	203°

Expérience N° 8.

L'opération a duré 1^h 15^m, elle a donné :

		gr
Eau		0,199
Acide carbonique		0,525
Produits de la combustion.	Eau	0,132
	Acide carbonique	0,816
		lit
Volume de l'eau écoulée		1,505
Gaz azote sec, ramené à zéro et à 0^m,760		1,203

Ces nombres donnent pour la composition du gaz :

Vapeur d'eau	0,115
Acide carbonique	0,124
Hydrogène carboné	0,038
Oxyde de carbone	0,156
Azote	0,567
	1,000
Pression au manomètre	0^m,034
Température du vent	205°

La charge qui correspond à ces deux expériences se co posait de 9 conges ½ de minerai. La fonte était déjà trop gr pour la sablerie, et la charge devait être ramenée à conges.

On a essayé, pendant quelques jours, de substitue 2 rasses de charbon 1 rasse de bois vert pesant 40 ki grammes et 20 kilogrammes de coke. On a renoncé bien

à cet essai, parce que la fonte devenait blanche et impropre à la fabrication de la sablerie, bien que l'on eût diminué progressivement la portée de minerai jusqu'à 8 conges $\frac{1}{2}$.

La nature des produits de la distillation du bois étant fort complexe, il est clair que le procédé que j'ai suivi ne peut pas donner la composition du gaz avec exactitude. Je rapporte toutefois ici, mais à titre de simple renseignement, les résultats de trois analyses.

Expérience N° 9.

La charge se compose de 3 rasses charbon, 1 rasse bois vert et 20 kilogrammes coke, 9 conges $\frac{1}{2}$ minerais. On portait la nouvelle charge depuis 18 heures quand l'expérience a été commencée. La flamme du gueulard est trouble et un peu rougeâtre. Voici les nombres obtenus :

		gr
Eau		0,345
Acide carbonique		0,712
Produits de la combustion.	Eau	0,183
	Acide carbonique	1,026
Volume de l'eau écoulée		1,737
		lit
Gaz azote sec, ramené à zéro et à 0^m,760		1,470

Ces nombres donnent :

Vapeur d'eau	0,154
Acide carbonique	0,128
Hydrogène carboné	0,041
Oxyde de carbone	0,148
Azote	0,529
	1,000
Pression au manomètre	0^m,030
Température du vent	195°

Expérience N° 10.

La charge est composée de la même manière que dans l'analyse précédente. La coulée du matin avait donné de la fonte truitée. La flamme du gueulard conserve la même couleur. L'opération a duré 1^h 30^m et a donné :

		gr
Eau		0,290
Acide carbonique		0,598
Produits de la combustion.	Eau	0,186
	Acide carbonique	0,932
		lit
Volume de l'eau écoulée		1,559
Gaz azote, ramené à zéro et à $0^m,760$		1,301

On tire de là :

Vapeur d'eau	0,148
Acide carbonique	0,123
Hydrogène carboné	0,048
Oxyde de carbone	0,147
Azote	0,534
	1,000
Pression au manomètre	$0^m,036$
Température du vent	185°

Expérience N° 11.

La coulée du jour où a été faite l'expérience (10) ayant donné de la fonte blanche, on a diminué 1 conge de mine. On portait cette charge depuis 27 heures lorsque l'expérience a été faite. Elle a donné :

		gr
Eau		0,460
Acide carbonique		0,803
Produits de la combustion.	Eau	0,265
	Acide carbonique	1,460
		lit
Volume de l'eau écoulée		2,302
Gaz azote sec, ramené à zéro et à $0^m,760$		1,937

D'où :

Vapeur d'eau	0,155
Acide carbonique	0,111
Hydrogène carboné	0,046
Oxyde de carbone	0,158
Azote	0,530
	1,000
Pression au manomètre	$0^m,015$
Température du vent	195°

Conclusions.

Si l'on compare les résultats de ces trois analyses entre eux et avec ceux des analyses précédentes, on voit que la proportion de vapeur d'eau a très-notablement augmenté, de même que celle des principes hydrogénés combustibles. L'analyse (11) présente, relativement aux deux autres, un excès notable de principes combustibles. Ce résultat doit être attribué à la diminution dans la portée de minerai qui était réduite à 8 conges $\frac{1}{2}$. En effet, si l'on calcule, pour chaque composition de charge, la quantité de minerai fondue par 1 de carbone pur, on trouve, en admettant que le charbon de meule renferme 8 pour 100 d'eau et 89 pour 100 de carbone, que le bois soit équivalent à 37 pour 100 de carbone et le coke à 90 pour 100, les nombres suivants :

1°. Dans le roulement au charbon de bois à 10 conges de minerai par charge, 1 de carbone fond 3,70 de minerai ;

2°. Dans le roulement au coke et au bois à 9 conges $\frac{1}{2}$ de minerai par charge, 1 de carbone fond 3,61 de minerai ;

3°. En ne portant que 8 conges $\frac{1}{2}$, 1 de carbone fond 3,20 de minerai.

Dans ce dernier roulement, les gaz doivent donc renfermer moins d'oxygène combiné que dans les deux autres.

Toutes les analyses que je viens de rapporter ont été faites sur les gaz à leur sortie du haut fourneau. Une seule analyse a été entreprise sur des gaz provenant de la profondeur de 3 mètres au-dessous du gueulard, au moyen d'un tube en cuivre, formé de trois parties vissées les unes aux autres et qui plongeait de cette hauteur dans le fourneau. Elle a donné pour résultat :

Vapeur d'eau.....	0,078
Acide carbonique.....	0,164
Hydrogène carboné.....	0,045
Oxyde de carbone.....	0,119
Azote.....	0,594
	1,000

Cette analyse n'a pas été répétée, parce que la partie inférieure du tuyau en cuivre s'est détachée. Elle a été faite au moment où le fourneau roulait au charbon seul. La grande quantité de vapeur d'eau que contiennent les gaz à cette profondeur dans le fourneau tient probablement à ce que les mines en grains criblent à travers les charbons jusqu'à une certaine distance du gueulard. On voit aussi s'accroître beaucoup la proportion d'acide carbonique. Mais ces faits sont trop remarquables pour qu'il ne soit pas nécessaire de les confirmer par de nouvelles expériences.

Avant de déduire des résultats obtenus la valeur calorifique des gaz du haut fourneau de Clerval, je ferai remarquer qu'on peut vérifier jusqu'à un certain point l'exactitude de leur composition, à l'aide des données que j'ai inscrites plus haut sur le roulement du fourneau. Si nous prenons, en effet, la composition moyenne des gaz, lorsque le fourneau avait son allure normale au charbon de bois, en la déduisant des analyses (1), (2), (3) et (4), on trouve que 1 litre renferme :

	lit		gr
Vapeur d'eau.....	0,117	pesant	0,0944
Acide carbonique .	0,125		0,2475
Hydrogène carboné	0,036		0,0260
Oxyde de carbone .	0,156		0,1961
Azote.....	0,566		0,7171
	1,000		1,2811

Ainsi 1 litre de gaz du fourneau, ramené à la température zéro et à la pression $0^m,760$, pèse $1^{gr},2811$, et sa densité, rapportée à celle de l'air, serait 0,0994. Les $1^{gr},2811$ renferment, abstraction faite de l'eau :

	gr
Carbone.....	0,1722
Hydrogène	0,0065
Oxygène.....	0,2909
Azote.....	0,7171

L'azote provient tout entier de l'air injecté dans le four-

neau ; dans la quantité de carbone figure le carbone contenu dans l'acide carbonique de la castine. L'oxygène renferme, outre celui qui correspond à l'azote dans l'air atmosphérique, l'oxygène cédé par les minerais et celui que contient l'acide carbonique de la castine. Or, d'après les analyses de charbon données plus haut, on peut admettre que le charbon de meule contient 8 pour 100 d'eau en moyenne, et le charbon desséché 89 pour 100 de carbone ; en partant de cette donnée et de la composition du lit de fusion indiquée au commencement de ce Mémoire, on trouve que le carbone contenu dans la castine et dans le minerai calcaire forme les 7 pour 100 du carbone total. En faisant cette correction, on aura :

Carbone de charbon de meule....	0,1603
Oxygène du vent et des minerais..	0,2600

La quantité d'oxygène des minerais, correspondante à 0,1603 de carbone dans le lit de fusion, est de 0,070, en supposant que l'oxyde de fer soit complétement réduit. On a donc pour l'oxygène du vent, $0^{gr},190$, qui correspond à $0^{gr},661$ d'azote, au lieu de $0^{gr},717$, trouvé directement. Cette différence tient probablement à ce que l'hydrogène se trouve en partie dans les gaz à l'état de liberté, ce qui augmenterait la proportion d'oxyde de carbone et par conséquent celle de l'oxygène. En effet, si nous supposons que tout l'hydrogène se trouve à l'état de liberté dans les gaz, il faudra transformer le carbone en oxyde. Or, $0^{gr},026$ d'hydrogène carboné contiennent 0,0199 de carbone, qui prennent $0^{gr},026$ d'oxygène pour passer à l'état d'oxyde de carbone. La proportion d'oxygène combiné dans les gaz serait donc augmentée de $0^{gr},026$, ce qui correspond à $0^{gr},081$ d'azote en plus. On trouverait alors $0^{gr},742$ d'azote au lieu de $0^{gr},717$.

La proportion d'hydrogène contenu dans les gaz est à peu près les 0,04 du poids du carbone, et par conséquent un peu

plus considérable que celle renfermée dans le charbon de meule. Il y a donc eu une petite quantité de vapeur d'eau décomposée.

On peut déduire très-exactement le volume de l'air qui traverse le fourneau du rapport qui existe entre le poids du carbone et celui de l'azote contenu dans les gaz, lorsqu'on connaît la quantité de carbone introduite dans un temps donné. Comme on passe moyennement 16 charges en 12 heures, et que chaque charge renferme 116 kil. de charbon, contenant eux-mêmes 95 kil. de carbone, il en résulte que l'on brûle en 12 heures 1,520 kil. de carbone; le fourneau a donc reçu dans le même temps 6,810 kil. d'azote, nombre qui correspond, par minute, au passage de $9^{m.c},44$, ou 255 pieds cubes d'air, ramené à zéro.

Ce résultat permettra de calculer la proportion d'air perdue par la tuyère ou par la tympe, en comparant le nombre $9^{m.c},44$ avec celui qui représente le volume d'air lancé par la buse, et qui est donné par la formule de M. d'Aubuisson :

$$p = 289 d^2 \sqrt{\frac{h(1 + 0,004t)}{b + h}}.$$

En y substituant les nombres qui correspondent à l'allure moyenne du fourneau :

$$t = 200^\circ; \quad h = 0,030; \quad b = 0,76; \quad d = 0,072,$$

on aura le volume de l'air lancé par seconde à la température de 200 degrés et par minute :

$$60q. = 23^{m.c},53,$$

qui, ramenés à zéro et à la pression $0^m,760$, représentent un volume de $13^{m.c},6$. On peut donc en conclure que les 0,33 environ de l'air lancé par la buse n'entrent pas dans le haut fourneau.

Il est facile de calculer quel est le volume des gaz qui sort par minute du haut fourneau. On a trouvé tout à l'heure que $9^{m.c},44$ représentait le volume de l'air introduit dans le

haut fourneau. Tout l'azote qu'il contient se retrouve dans les gaz du gueulard. On aura donc le volume de ceux-ci au moyen de la proportion :

$$56,6 : 79 :: 9,44 : x, \text{ d'où } x = 13^{m.c},20.$$

Or 1 litre du gaz pèse $1^{gr},2811$, les $13^{m.c},20$ pèsent donc	$16^{kil},92$
Et comme les $9^{m.c},44$ ne pèsent que.....	12,26
La différence	4,66

représente le poids des substances volatiles expulsées par minute par le gueulard. En cherchant à déduire le même nombre de la proportion des principes volatils du lit de fusion, on trouve $5^{k},06$. Cette différence provient probablement d'une certaine quantité d'oxygène qui reste dans le laitier et du carbone qui reste fixé dans la fonte.

Détermination de la chaleur de combustion.

Pour déterminer la quantité de chaleur et la température que peut donner la combustion des gaz du haut fourneau, je prendrai les résultats des expériences faites par M. Dulong sur la combustion des différents gaz, et dont il est fait mention dans les *Comptes rendus* de l'Académie des Sciences (1838, 2e semestre, page 874). En prenant pour unité la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 degré un gramme d'eau liquide, M. Dulong a trouvé que :

1 litre d'hydrogène donne en brûlant		3,106 unités.
1 *id.* de vapeur de carbone.....		7,858
1 *id.* d'hydrogène protocarboné...	$(H^2 C^{\frac{1}{2}})$	9,587
1 *id.* d'oxyde de carbone	$(C^{\frac{1}{2}} O^{\frac{1}{2}})$	3,130

On sait que 1 litre d'hydrogène protocarboné exige pour sa combustion complète 2 litres d'oxygène; 1 litre d'oxyde de carbone prend $\frac{1}{2}$ litre d'oxygène. En prenant pour composition moyenne des gaz celle que j'ai rapportée plus haut, on trouvera facilement que 1 litre de ce gaz doit donner en

brûlant 833,4 unités de chaleur, en consommant $0^{lit},150$ d'oxygène ou $0^{lit},713$ d'air atmosphérique.

Le volume des gaz qui se dégagent du gueulard dans une minute étant de $13^{m.c},20$ ramené à zéro et sous la pression $0^{m},760$, la quantité de chaleur dégagée dans le même temps sera 11,000,870 ou $11,001^{c}$, en prenant pour unité de chaleur celle qui élèverait de 1 degré la température de 1 kil. d'eau liquide, et par heure 660,060 calories (1).

Le volume de l'air nécessaire pour brûler complétement les gaz sera $13^{m.c},2 \times 0,713 = 9^{m.c},411$; c'est-à-dire un nombre à très-peu près égal à celui qui représente le volume de l'air introduit dans le fourneau, ramené à zéro et à la pression de $0^{m},760$.

Pour avoir le rapport entre la quantité de chaleur développée par la combustion du gaz et celle que peut produire le combustible employé, on fera le calcul suivant : 1 litre de gaz du haut fourneau renferme $0^{gr},1722$ ou $0^{lit},1585$ de vapeur de carbone dont il faut retrancher 7 pour 100 pour le carbone provenant de la castine. Il reste $0^{lit},1474$, dont la combustion doit développer, d'après M. Dulong, 1158,3 unités de chaleur. Il faut ajouter à ce nombre l'effet calorifique dû à l'hydrogène que renferme le charbon de meule. Pour y parvenir, je ferai remarquer que, dans les analyses que j'ai données plus haut, la proportion d'hydrogène, en en défalquant celle qui correspond à l'oxygène contenu, est moyennement les 2,3 pour 100 de la quantité de carbone. Nous avons vu que la proportion de carbone contenu dans 1 litre de gaz est 0,1603. L'hydrogène correspondant est donc $0^{gr},0037 = 0^{lit},041$, dont la combustion doit déve-

(1) En admettant que, dans les machines à vapeur, on consomme 25,000 calories par force de cheval et par heure, on trouve que la flamme du haut fourneau de Clerval peut produire une force de 26,4 chevaux-vapeur, résultat presque identique avec celui trouvé par M. Robin pour le haut fourneau de Niederbronn.

lopper 127 unités de chaleur. La valeur calorifique du combustible introduit dans le fourneau et correspondant à 1 litre de gaz serait donc 1,285,3 et comme 1 litre de gaz donne 833 unités de chaleur par la combustion, il en résulte que les gaz peuvent produire les 64,8 pour 100 de la chaleur que représente le combustible employé.

Je n'ai pas tenu compte, dans cette appréciation, de la quantité de chaleur enlevée par les gaz à l'état de calorique sensible. La température des gaz varie très-notablement dans un intervalle de temps assez faible. Aussitôt que la charge est jetée dans le fourneau, on remarque que les gaz, transparents quelques minutes auparavant, deviennent nuageux et troubles. Ce résultat fait croire, au premier aspect, que la quantité de vapeur d'eau est plus considérable au moment de la charge que dans les autres périodes de l'opération. Mais il me semble qu'on doit l'attribuer au refroidissement que le contact du charbon et du minerai fait éprouver au courant de gaz, et qui est tel, qu'une partie de la vapeur contenue passe à l'état vésiculaire ou de vapeur visible. Des expériences faites dans le fourneau de Clerval sur la réduction des minerais de fer prouvent qu'ils retiennent encore une quantité très-notable d'eau après deux heures de séjour dans le fourneau. Ainsi il est à présumer que les gaz ne renferment pas beaucoup plus d'eau au moment de la charge qu'à toute autre époque. Seulement la température du courant s'abaisse au point de déterminer, pour un instant, la condensation de cette vapeur (1). On peut donc, sans erreur bien notable, se dispenser de tenir compte de la chaleur sensible enlevée par les gaz au moment où ils sortent du fourneau.

---

(1) Les gaz renfermant 0,116 de vapeur d'eau, la tension de la vapeur dans le mélange correspond à $0^m,088$ de mercure. Pour que cette vapeur devienne visible en passant à l'état vésiculaire, il faut donc que la température du courant s'abaisse au-dessous de 50 degrés centigrades, qui correspond à une tension maximum pour la vapeur d'eau de $0^m,088$.

La température maximum que l'on peut atteindre en brûlant les gaz du gueulard, au moyen de l'air atmosphérique, est un élément qu'il est essentiel de connaître. Nous avons dit que 1 litre de gaz consommait, pour sa combustion complète, $0^{lit},713$ d'air. Les $0^{lit},036$ d'hydrogène carboné absorbent $0^{lit},072$ d'oxygène, en produisant $0^{lit},072$ de vapeur d'eau, et $0^{lit},036$ d'acide carbonique; $0^{lit},156$ d'oxyde de carbone consomment $0^{lit},078$ d'oxygène et produisent $0^{lit},156$ d'acide carbonique. On a donc :

	lit
Gaz combustibles. . . .	1,000
Air.	0,713
	1,713

qui donnent par leur combustion complète :

	lit	Poids. gr	Quantité de chaleur que prend le gaz en s'échauffant de 1°.
Acide carbonique. .	0,317	0,628	0,1387
Vapeur d'eau.	0,189	0,152	0,1292
Azote.	1,129	1,430	0,3938
	1,635	2,210	0,6617

Ainsi donc 1 litre de gaz donne, par sa combustion, $2^{gr},210$ de produit, dont la température ne peut s'élever de 1 degré qu'au moyen de la quantité de chaleur représentée par 0,6617. La température qui résultera de la combustion sera donc :

$$\frac{833,4}{0,6617} = 1,259^{\circ}.$$

Dans cette détermination, j'ai supposé que la température initiale du gaz était zéro. Le nombre obtenu est donc un minimum. En admettant que la température du gaz fût de 100 degrés et celle de l'air employé à la combustion de 30 degrés, il faudrait ajouter au nombre 833,4 les unités de chaleur que contiennent 1 litre du mélange gazeux à 100 degrés et $0^{lit},713$ d'air à 30 degrés, et qui sont respec-

tivement 39 et 7 unités. La température de combustion serait dans ce cas

$$\frac{833,4 + 46}{0,6617} = 1,327^{\circ}.$$

Si l'on alimentait la combustion avec de l'air échauffé à 200 degrés, la température atteindrait

$$\frac{833,4 + 39 + 49}{0,6617} = 1,394^{\circ}.$$

Tous ces calculs supposent que la chaleur spécifique des gaz reste constante à mesure que leur température s'élève.

J'ai annoncé, au commencement de ce Mémoire, que la détermination relative de l'hydrogène et de l'hydrogène carboné dans les gaz n'avait pas d'influence bien sensible sur la valeur calorifique déduite de la composition du gaz. Pour le prouver, reprenons la composition moyenne qui a été adoptée dans les calculs qui précèdent :

Vapeur d'eau	0,117
Acide carbonique.....	0,125
Hydrogène carboné....	0,036
Oxyde de carbone	0,156
Azote.....	0,566
	1,000

Si l'on admet que l'hydrogène se trouve entièrement à l'état de liberté dans le gaz, la composition de celui-ci deviendra :

		Quantité de chaleur développée par la combustion.	Volume de l'oxygène consommé.
Vapeur d'eau	0,109		
Acide carbonique.	0,116		
Hydrogène.....	0,067	207,7	0,0335
Oxyde de carbone.	0,179	550,3	0,0895
Azote.....	0,529		
	1,000	758,0	0,1230

Ainsi 1 litre de ce gaz développe 558 unités de chaleur par la combustion, en consommant $0^{lit},123$ d'oxygène ou $0^{lit},586$ d'air. Le volume des gaz dégagés par minute serait donné par la proportion :

$$52,9 : 79 :: 9,44 : x, \text{ d'où } x = 14^{m.c},094.$$

Le nombre des calories dégagées par minute serait donc $14,094 \times 758$ ou 10,683, au lieu de 11,001 que nous avons trouvé dans la première supposition. Ainsi l'on peut conclure que la chaleur réelle, développée par minute par la combustion des gaz, est comprise entre les deux nombres très-rapprochés 10,683 et 11,001.

Le volume de l'air consommé par minute pour la combustion ne serait plus, dans la seconde supposition, que $8^{m.c},258$ au lieu de $9^{m.c},420$.

Dans le cas où l'hydrogène se trouverait tout entier à l'état de liberté dans ce gaz, on apprécierait comme il suit la température que peut donner la combustion :

	lit
Gaz combustibles...	1,000
Air atmosphérique ..	0,586
	1,586

dont la combustion complète donnera :

	lit	gr	Quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1° la température du gaz.
Acide carbonique.	0,295	0,584	0,129
Vapeur d'eau....	0,176	0,142	0,121
Azote.....	0,992	1,257	0,345
	1,463	1,983	0,595

La température développée par la combustion serait donc $\frac{758}{0,595} = 1,274$ degrés, nombre très-peu différent de 1,259 degrés, auquel je suis parvenu, en admettant dans les gaz de l'hydrogène carboné. Je ferai remarquer que la chaleur totale dégagée, lorsqu'on suppose que tout

l'hydrogène est à l'état d'hydrogène carboné, est un peu plus grande que dans l'autre supposition, tandis que la température maximum est au contraire un peu plus faible. Cela tient à ce que, dans le premier cas, il faut introduire un peu plus d'air que dans le second pour brûler complétement le gaz, de sorte que la chaleur produite se répartit sur une plus grande masse de gaz.

Je ferai observer aussi que la limite extrême de la température développée par la combustion diminuera rapidement, toutes choses égales d'ailleurs, lorsque la proportion de vapeur d'eau augmentera, effet qu'on doit attribuer à ce que le calorique spécifique de la vapeur d'eau est plus que triple de celui de l'air et presque quadruple de celui de l'acide carbonique.

Pour faire apprécier cette considération, je supposerai pour un instant que le gaz du haut fourneau soit complétement dépouillé des 0,117 de vapeur d'eau qu'il renferme. On déterminerait alors comme il suit la température développée par la combustion.

	lit
Gaz combustibles	0,883
Air.....	0,713

dont la combustion donnera, ainsi qu'on l'a vu plus haut :

	lit	gr	Quantité de chaleur que prend le gaz en s'échauffant de 1°.
Acide carbonique...	0,317	0,628	0,1387
Vapeur d'eau.... .	0,094	0,076	0,0646
Azote	1,129	1,430	0,3938
	1,540	2,134	0,5971

La température obtenue sera $\frac{833,4}{0,597} = 1,399$ degrés. Nous avons trouvé 1,259 degrés par la combustion du même gaz renfermant 0,117 de vapeur d'eau. Ainsi l'on voit qu'en dépouillant le gaz de vapeur d'eau et en le brûlant à zéro

avec de l'air aussi à zéro, on arrivera à obtenir une température aussi élevée qu'en brûlant du gaz à 100 degrés par de l'air à 200 degrés, ce qui donnerait une température de combustion de 1,394 degrés.

Les essais faits par M. Robin ont constaté que l'on peut conduire les gaz à de grandes distances du gueulard et les brûler sur le sol même des usines, au lieu de placer les appareils près du point où ils se dégagent. On voit par les nombres que je viens de rapporter que, si l'on veut obtenir un haut degré de chaleur par la combustion de ces gaz, surtout de ceux qui proviennent de fourneaux alimentés avec du bois, il sera nécessaire de les conduire, avant de les brûler, dans de vastes réservoirs où pourra se condenser la majeure partie de la vapeur d'eau qu'ils entraînent, et dont la proportion augmente rapidement à mesure qu'on remplace le charbon par du bois en nature.

Conclusions.

En résumé : les résultats obtenus dans la seconde partie de ce Mémoire peuvent se résumer ainsi qu'il suit :

1°. Pour un fourneau, comme celui de Clerval, qui produit 3,000 kilogrammes de fonte de sablerie en 24 heures et qui consomme 122 de charbon pour 100 de fonte, la quantité de chaleur dégagée par minute par la combustion du gaz est de 11,000 calories, qui équivalent à 26 chevaux-vapeur.

2°. On trouve facilement, d'après le calorique spécifique de l'air, la quantité de chaleur nécessaire pour porter à 300 degrés le volume d'air ramené à zéro qui sort par minute de la buse, et qui a été évaluée plus haut à $13^{m.c}$,6. Le nombre qu'on obtient est égal à 1,410 calories, et représente les 0,128 de la chaleur totale. Celle-ci suffit donc, et au delà, pour chauffer l'air, et pour fournir la vapeur nécessaire à la mise en mouvement de la machine soufflante, force évaluée à 7 ou 8 chevaux-vapeur.

3°. Si l'on veut appliquer la chaleur du gueulard à la dessiccation du bois, en faisant traverser le combustible par les gaz brûlés, on trouve, en supposant que la vapeur d'eau et les gaz sortent ensemble des séchoirs à la température de 100 degrés, que la quantité d'eau expulsée par minute serait de $15^{kil},5$, quantité correspondante à 62 kilogrammes de bois vert. La chaleur totale serait suffisante pour la dessiccation du bois consommé dans les hauts fourneaux au moins.

4°. La température de la fusion de la fonte, étant évaluée à 1,200 degrés, on arrivera à la produire par la combustion des gaz, puisque dans le cas le plus défavorable la température du mélange gazeux atteint 1,259 degrés, et qu'elle peut s'élever jusqu'à 1,394 par l'emploi de l'air échauffé à 200 degrés, les gaz ayant au moins une température de 100 degrés. Les gaz complétement secs à la température 0 degré et brûlés par l'air à 0 degré donneront une température de 1,399 degrés.

Les mêmes gaz à 0 degré, brûlés par de l'air chauffé à 300 degrés, donneront une température de 1,502 degrés.

5°. Dans tous les cas, le volume de l'air nécessaire pour la combustion du gaz doit être peu différent de celui du gaz introduit dans le fourneau, et qu'on peut évaluer approximativement aux 0,66 ou aux 0,75 de celui lancé par la buse. On peut admettre qu'il faudra ordinairement $9^{m.c}$ d'air par minute pour brûler les gaz d'un haut fourneau produisant 3,000 kilog. de fonte en 24 heures, ou $3^{m.c}$ par 1,000 kilogrammes de fonte produite en un jour.

Les conclusions qui précédent et qui se déduisent des expériences consignées dans les deux parties de ce Mémoire, se rapportent aux gaz pris à la sortie du gueulard : elles concernent le haut fourneau de Clerval. Dans un prochain Mémoire je donnerai les conclusions auxquelles m'ont conduit des expériences semblables exécutées sur d'autres hauts fourneaux.

V.

Recherches sur la composition des gaz des hauts fourneaux. (Deuxième Mémoire.)

Les recherches que renferme ce Mémoire font suite à celles que j'avais entreprises dès l'année 1839 sur la composition des gaz des hauts fourneaux, d'après les ordres de M. le Directeur général des Ponts et Chaussées et des Mines. Dans un premier travail, p. 224, je m'étais borné à examiner la nature de ces gaz à leur sortie du haut fourneau. Depuis cette époque, on est parvenu à utiliser la chaleur produite par leur combustion pour l'affinage de la fonte, mais en les prenant dans le haut fourneau à une certaine distance du gueulard. Il devenait donc intéressant d'examiner quelles variations éprouve la composition du courant gazeux qui traverse le haut fourneau à mesure qu'on s'éloigne de l'orifice de sortie. J'avais l'espoir que les résultats de ces expériences seraient utiles pour déterminer la hauteur à laquelle il convenait d'enlever les gaz de l'appareil et l'influence de la soustraction d'une partie plus ou moins considérable de ces gaz sur la marche du haut fourneau. Enfin, la comparaison des résultats obtenus par l'analyse de ces produits gazeux sur toute la hauteur du fourneau, depuis la tuyère jusqu'au gueulard, devait servir à reconnaître et à classer d'une manière nette les diverses réactions qui se produisent dans chacune de ses parties.

Cette série d'expériences a été exécutée d'abord au haut fourneau de Clerval, puis à celui d'Audincourt (Doubs). M. A. Bouchot, l'un des propriétaires des usines de Clerval, et M. Jeanmaire, directeur des usines de la compagnie d'Audincourt, ont bien voulu prendre quelque intérêt à mes essais, et se sont prêtés avec la plus grande complai-

sance à toutes les dispositions nécessaires à leur exécution. C'est pour moi un devoir de leur en témoigner ici toute ma reconnaissance.

Je m'occuperai d'abord de décrire les appareils que j'ai employés et le mode d'analyse que j'ai suivi. Je donnerai en second lieu les résultats des analyses faites dans chacun des fourneaux aux différentes hauteurs où le gaz a été pris.

Description des procédés d'analyse.

Les mélanges gazeux que j'avais à examiner pouvaient renfermer de la vapeur d'eau, de l'acide carbonique, de l'oxyde de carbone, de l'hydrogène, de l'hydrogène carboné et de l'azote.

L'appareil que j'ai décrit dans mon premier Mémoire se composait : 1° d'un tube en verre recourbé à angle droit et plongeant dans le fourneau ; 2° d'un tube rempli de chlorure de calcium pour retenir la vapeur d'eau ; 3° d'un condenseur à potasse pour absorber l'acide carbonique ; 4° d'un tube rempli d'oxyde de cuivre, destiné à transformer les gaz combustibles en eau et en acide carbonique ; 5° d'un appareil à chlorure de calcium suivi d'un second condenseur à potasse pour absorber les produits de la combustion ; 6° enfin d'une bouteille communiquant par sa tubulure supérieure avec tous les appareils précédents et munie vers le fond d'une tubulure latérale. En faisant écouler l'eau contenue dans la bouteille par la tubulure inférieure, on aspirait le gaz du fourneau qui perdait successivement l'eau, l'acide carbonique et les gaz combustibles qu'il renfermait, en sorte que l'azote seul arrivait dans la bouteille d'aspiration. On calculait son volume d'après celui de l'eau qui s'était écoulée.

Dans ce mode d'analyse, on ne connaissait pas le volume du gaz sur lequel on opérait, et la détermination de l'azote présentait quelque incertitude, puisque le volume de l'eau qui

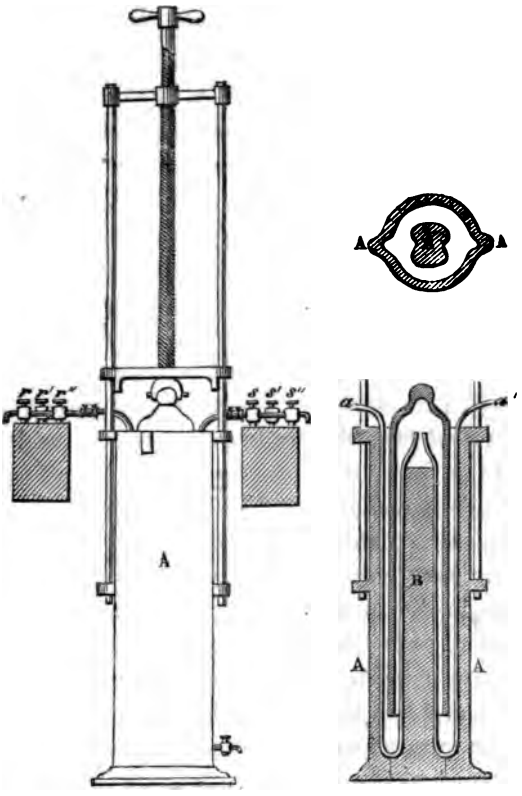
s'était écoulée ne donnait exactement l'azote qu'après l'expulsion de tout l'air contenu dans l'appareil. Enfin, comme on n'avait aucun moyen d'apprécier la quantité d'oxygène cédée par l'oxyde de cuivre pour transformer les gaz combustibles en eau et en acide carbonique, l'analyse ne donnait que l'hydrogène et le carbone qu'ils contenaient, sans qu'on pût déterminer par le calcul les proportions relatives des trois gaz : oxyde de carbone, hydrogène et hydrogène protocarboné. La disposition de l'appareil exigeait de plus que l'analyse fût faite dans l'endroit même où le gaz se dégageait.

L'incertitude des expériences eudiométriques quand on les applique à l'analyse des mélanges qui renferment plusieurs gaz combustibles, dont quelques-uns en faible proportion, ne m'a pas permis de substituer ce procédé à celui que je viens d'indiquer. J'ai cherché, en modifiant mon premier appareil, à éviter les causes d'erreur qu'il présentait, et je pense avoir réussi à obtenir une précision bien suffisante pour le genre de recherches que j'avais entrepris.

Le gazomètre à mercure dans lequel je recueille et je mesure le gaz destiné à l'analyse, se compose d'une cuve cylindrique en fonte A de $0^m,50$ de hauteur et de $0^m,10$ de diamètre. La cloche à gaz est aussi cylindrique : sa hauteur est égale à celle de la cuve, et son volume d'environ 1,600 centimètres cubes. Elle peut être fixée par un bouton à l'extrémité d'une vis verticale qui s'engage à $0^m,45$ de hauteur au-dessus du rebord supérieur de la cuve en fonte, dans un écrou supporté par deux tringles verticales. Cette disposition permet de soulever et d'abaisser avec facilité la cloche à gaz.

Une partie du vide intérieur de la cuve en fonte est remplie par un cylindre en fonte B concentrique au premier, et qui diminue le volume du mercure nécessaire pour le remplir. — Les gaz peuvent entrer dans la cloche et en sortir au moyen de deux tubes recourbés *aa'* qui descendent le long de la cuve en fonte, remontent le long du manchon

intérieur B dans deux rainures ménagées à cet effet, de manière que leurs extrémités supérieures soient très-voisines et arrivent à peu près à la hauteur du rebord supérieur de la cuve en fonte. Cette disposition permet de remplir et de vider à volonté la cloche à gaz, en la soulevant ou en l'abaissant, et en la mettant en communication, soit avec la source de gaz, soit avec les appareils qu'il doit traverser. Le volume du gaz qui reste dans la cloche, quand



elle a été abaissée jusqu'à la rencontre des deux tubes, est très-faible. Une petite gla ce, scellée avec du mastic sur

l'une des parois de la cuve en fonte, permet de lire le volume du gaz contenu dans la cloche soulevée. L'erreur qu'on peut commettre sur la détermination du volume qui était compris généralement entre 1,500 et 1,600 centimètres cubes, ne doit pas dépasser 2 ou 3 centimètres cubes.

Pour faire arriver dans la cloche le gaz destiné à l'expérience, on opère de la manière suivante : le tube *a* est fixé par un tube en caoutchouc à un robinet à trois branches *r*, *r'*, *r''*. L'un des robinets *r'* est placé sur un tuyau perpendiculaire à la ligne qui joint les deux autres. Le robinet *r* s'ajuste avec un tube en U, *d*, rempli de pierre ponce imbibée d'acide sulfurique concentré. Si le gazomètre se trouve placé près de l'endroit où le gaz se dégage, il suffit d'ajuster au tube *d* un tube droit qui plonge dans le courant de gaz; en ouvrant alors les deux robinets *r*, *r''*, et soulevant la cloche, on voit que le gaz doit s'y rendre après s'être desséché dans l'appareil *d*; mais comme le gaz est encore mêlé avec un peu d'air atmosphérique provenant des tubes, on ferme le robinet *r*, on ouvre *r'*, *r''*, et l'on fait descendre la cloche. Cela fait, on ferme *r'*, on ouvre *r*, *r''*, et l'on recommence l'aspiration. On répète cette opération deux ou trois fois, pour être sûr que le gaz contenu dans la cloche est tout à fait pur; on note à chaque fois le volume du gaz introduit; l'augmentation de poids du tube *d* donne l'eau correspondante au volume total du gaz; il faut soulever la cloche lentement pour que la dessiccation soit complète.

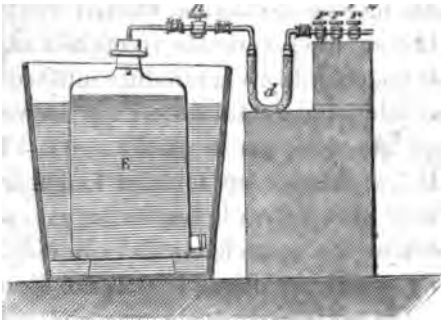
Lorsque la disposition des lieux ne permet pas de placer l'appareil pour l'analyse des gaz près du point où ils se dégagent, on emploie le moyen suivant :

On se sert d'une bouteille E de trois à quatre litres de capacité, et munie d'une tubulure inférieure que l'on ferme avec un bouchon; on remplit cette bouteille d'eau recouverte d'une couche d'huile de quelques centimètres d'épaisseur. Le goulot porte un bouchon traversé par un tube recourbé à angle droit, à l'extrémité duquel se trouve un

robinet *n* : pour aspirer le gaz au moyen de cette bouteille, on ajuste au robinet *n* un tube droit qui va plonger dans le courant, et l'on place la bouteille, exactement remplie d'eau et d'huile, dans un seau à moitié rempli d'eau qui baigne la tubulure inférieure.

En enlevant le bouchon placé à cette tubulure, et ouvrant en même temps le robinet *n*, l'eau s'écoulera, et le gaz viendra remplir le vide formé dans la bouteille.

Les premières portions qui passent sont souillées par l'air des tubes ; pour avoir le gaz pur, on referme le robinet, on soulève doucement le bouchon supérieur, sans l'enlever pourtant, et l'on enfonce la bouteille dans l'eau jusqu'à ce qu'elle se remplisse exactement ; le gaz s'échappe entre la tubulure supérieure et le bouchon.



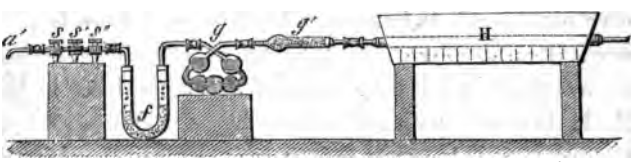
Cela fait, on remet le bouchon en place, on rouvre le robinet, et on aspire de nouveau le gaz pour remplir la bouteille jusqu'à une petite distance de la tubulure inférieure ; on referme celle-ci, on tourne le robinet, et le gaz se trouve ainsi isolé. Il faut alors le transvaser dans le gazomètre ; il suffit pour cela d'ajuster le tube de caoutchouc fixé au robinet *n* au tube à ponce *d*, et de placer la bouteille E de nouveau dans l'eau.

En enlevant le bouchon inférieur et ouvrant le robinet *n*, on voit qu'il est facile de faire passer dans la cloche le gaz que contient la bouteille d'aspiration ; à mesure qu'on soulève la cloche, l'eau rentre dans la bouteille par la tubulure ; les premières portions de gaz sont rejetées comme je l'ai dit tout à l'heure.

Dans cette disposition, on voit que le gaz est aspiré dans la bouteille E, et doit en sortir sans avoir été en contact avec l'eau qui pourrait en altérer la composition. J'ai constaté d'ailleurs directement que la composition des gaz aspirés ne variait pas sensiblement après deux ou trois heures de séjour dans la bouteille; il suffisait pour cela d'en faire deux analyses consécutives. J'ai fait cette comparaison à plusieurs reprises, en analysant des gaz qui contenaient jusqu'à 12 pour 100 de leur volume d'acide carbonique.

Lorsqu'on opère ainsi, il faut faire une détermination séparée pour la vapeur d'eau; on intercale entre le robinet *n* et le tube qui plonge dans le courant de gaz, un appareil taré qui renferme, soit de l'acide sulfurique bouilli, soit du chlorure de calcium. On fait écouler l'eau contenue dans la bouteille par un tube recourbé à angle droit, qui traverse le bouchon fixé à la tubulure inférieure; le volume de l'eau écoulée donne celui du gaz qui arrive dans la bouteille, et qu'on ramène par le calcul à zéro et à la pression de $0^m,760$. Il faut chauffer sur toute sa longueur le tube dont l'extrémité plonge dans le courant de gaz, pour éviter qu'il ne s'y dépose des gouttelettes d'eau liquide. L'excès de poids de l'appareil taré donne la quantité d'eau cherchée.

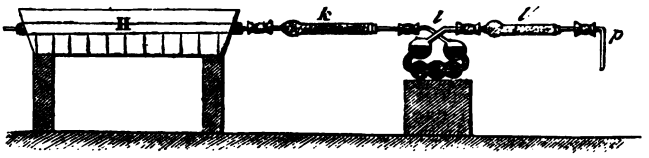
Quand le gazomètre à mercure contient le volume du gaz sec destiné à l'analyse, on ferme les trois robinets *r*, *r'*, *r''*,



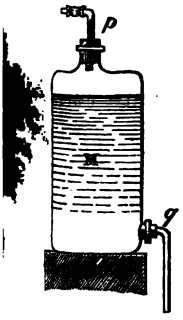
on mesure le gaz en faisant en sorte que le niveau du mercure soit le même à l'intérieur et à l'extérieur; on note la température et la pression barométrique.

L'appareil fixé au tube *a'*, par lequel va s'écouler le gaz, se compose : 1° d'un triple robinet *s*, *s'*, *s''*, semblable à

r, r', r''; 2° d'un tube en U, f, rempli de ponce imbibée d'acide sulfurique concentré; 3° d'un condenseur de Liebig, g, contenant une dissolution de potasse à 45 degrés de l'aréomètre, et suivi d'un tube g', rempli de fragments de potasse caustique; 4° d'un tube en verre vert H, rempli

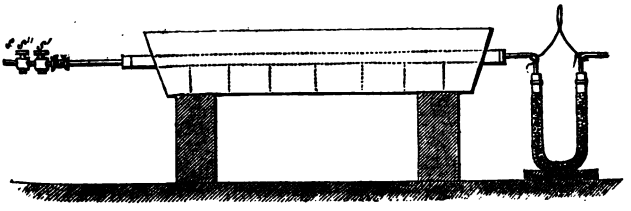


d'un mélange de planures de cuivre grillées, et d'oxyde provenant de la calcination du nitrate; 5° on dispose à la suite un tube k, rempli de chlorure de calcium en petits fragments; 6° un condenseur à potasse l, suivi d'un tube à potasse solide l'; 7° une bouteille M à tubulure latérale.



Le tube p qui traverse la tubulure supérieure, ne descend que de quelques centimètres dans la bouteille; l'eau qu'elle contient peut s'écouler par un tube q, recourbé à angle droit et effilé à son extrémité inférieure, qui peut tourner dans le bouchon placé au bas du vase. Ce vase fait fonction d'aspirateur.

Le robinet s' placé perpendiculairement aux deux autres, communique avec un tube en porcelaine de $0^m,50$ de longueur rempli de cuivre réduit par l'hydro-



gène et disposé de manière à pouvoir être chauffé sur toute sa longueur. L'autre extrémité de ce tube de porcelaine s'adapte à un tube en U rempli de ponce granulée, imbibée d'une dissolution concentrée de potasse.

La partie du tube à combustion qui se trouve sur le petit fourneau en tôle, a $0^m,20$ de longueur et le diamètre ordinaire des tubes de verre vert employés dans les analyses organiques. Deux tubes de petit diamètre sont soudés aux deux extrémités, et communiquent avec les appareils *g'* et *k* par des tuyaux en caoutchouc. Dans l'analyse des gaz qui renferment une proportion un peu considérable d'hydrogène, comme 5 à 6 pour 100, il vaut mieux employer un tube à combustion fermé par un bouchon du côté qui communique avec le chlorure de calcium; autrement on courrait le risque de perdre un peu d'eau qui se condenserait dans le tube étroit ou dans le tuyau de caoutchouc.

Le tube *f*, qui renferme de l'acide sulfurique, est destiné à retenir les dernières traces d'humidité provenant du gaz ou de l'azote qu'on doit faire circuler dans l'appareil. On pèse à la fois les deux tubes *g*, *g'* destinés à retenir l'acide carbonique, ensuite le tube *k*, qui donne la proportion d'eau d'après laquelle on conclut le poids de l'hydrogène, puis les deux appareils *l*, *l'*, qui retiennent l'acide carbonique produit par la combustion du gaz. On pèse aussi avant l'opération le tube à combustion H; on commence par enlever l'eau hygrométrique de l'oxyde de cuivre, en chauffant le tube et aspirant au travers un courant d'air sec; puis on le laisse refroidir en bouchant une de ses extrémités et adaptant à l'autre un tube rempli de chlorure de calcium qui n'y laisse rentrer que de l'air sec. Quand le tube est froid, on le pèse. Ceux que j'employais pesaient remplis 70 à 80 grammes. Je me suis assuré que le tube placé sur la balance n'augmentait pas sensiblement de poids dans l'espace de dix à quinze minutes; on a soin d'ailleurs de placer un petit tampon d'amiante aux deux extrémités

du tube pour empêcher un renouvellement trop facile de l'air. Après la pesée du tube à combustion, on le recouvre sur toute sa longueur d'une feuille de platine, et on assemble tous les appareils que j'ai indiqués, à l'aide de tubes de caoutchouc. Pour être sûr que les jointures tiennent, il faut, en tenant fermés tous les robinets, renverser le tube q : au bout de quelques instants il ne doit plus sortir d'eau par ce tube.

Avant de commencer l'analyse, il faut chasser tout l'air de l'appareil et le remplacer par un gaz qui ne puisse pas augmenter ou diminuer le poids du tube à combustion et des autres appareils tarés. Il suffit pour cela d'y faire passer de l'azote préparé par le procédé employé par MM. Dumas et Boussingault pour l'analyse de l'air. En chauffant sur toute sa longueur le tube de porcelaine qui renferme le cuivre métallique, ouvrant les deux robinets s', s'', et renversant le tube q, il est évident qu'au bout d'un certain temps, il n'y aura plus que de l'azote dans tout l'appareil. J'en faisais passer ordinairement 300 à 400 centimètres cubes. On ferme alors le robinet s', on commence à chauffer le tube à combustion, et bientôt on ouvre le robinet s, par lequel le gaz contenu dans la cloche arrive dans les tubes à analyse. On fait marcher l'opération avec la vitesse que l'on désire, en abaissant plus ou moins rapidement la cloche. L'emploi simultané de celle-ci, qui agit par compression, et de la bouteille M, qui agit par aspiration, permet de régler convenablement la tension du gaz qui circule dans l'appareil. J'opérais assez ordinairement sur $1^{lit},500$ de gaz, dont la combustion durait environ une heure. Lorsque la cloche arrive en bas, on peut, si l'on veut, mesurer le volume du gaz qui reste, pour le déduire du volume total; mais il vaut mieux aspirer dans la cloche une certaine quantité d'azote, puis faire passer le mélange dans l'appareil. On mesure encore le volume du gaz qui reste dans la cloche, et comme on connaît celui qui restait

primitivement et celui de l'azote introduit, il est facile de faire la correction. Dans mes expériences, cette correction est fort peu de chose; elle n'a jamais dépassé 2 à 3 centimètres cubes. L'erreur que l'on peut commettre dans ce cas est d'autant moindre que le volume de l'azote introduit est plus grand par rapport à celui du gaz restant. Pour terminer l'expérience, on balaye l'appareil avec de l'azote, et on ne le démonte que quand le tube à combustion est bien refroidi. On pèse de nouveau les différentes parties du système.

Le tube à combustion ne renferme de cuivre métallique que sur 2 à 3 centimètres à partir de son extrémité antérieure. La limite entre l'oxyde et le métal réduit est très-nette, et cette circonstance prouve que la combustion du gaz est complète à peu de distance de son entrée dans le tube.

En opérant ainsi on a : 1° le poids de l'acide carbonique contenu dans le gaz; 2° ceux de l'hydrogène et du carbone renfermés dans la partie combustible; 3° le poids de l'oxygène qui a servi à transformer les gaz combustibles en eau et en acide carbonique. On a donc tous les éléments nécessaires pour calculer la proportion relative des trois gaz combustibles, hydrogène, gaz des marais et oxyde de carbone. Comme on connaît d'ailleurs le volume total du gaz employé, il est facile d'en déduire le volume de l'azote par différence.

Dans toutes mes analyses, j'ai placé constamment un tube rempli de fragments de potasse solide à la suite du condenseur de Liebig. J'ai constaté qu'en supprimant le tube g', et en faisant communiquer directement g avec le tube à combustion, la proportion d'hydrogène était toujours sensiblement plus forte que dans le cas contraire. Le tube à potasse solide est nécessaire pour retenir les traces de vapeur d'eau enlevées à la potasse liquide par le courant de gaz ou d'azote sec qu'on fait circuler dans l'appareil. Pour reconnaître d'ailleurs si la condensation de l'acide

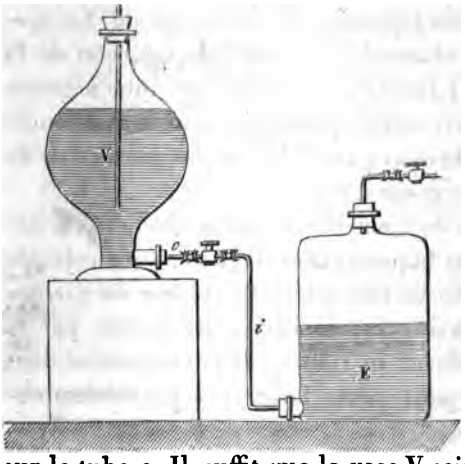
carbonique s'opérait complétement dans l'expérience, j'ai placé à la suite du tube *g'* un tube en U, contenant d'un côté de la ponce en grains imbibée d'une dissolution de potasse, et de l'autre des fragments de potasse solide. En opérant sur le même volume de gaz qu'à l'ordinaire et de la même manière, j'ai trouvé que le poids du tube à ponce n'avait varié que de 1 milligramme pendant l'expérience. Le degré d'exactitude dont j'avais besoin me permettait de négliger une pareille cause d'erreur.

On peut, au lieu de doser l'azote par différence, en déterminer directement la proportion. Il suffit, pour cela, de comparer pendant un certain temps le volume du gaz qui sort de la cloche avec celui de l'eau qui s'écoule par le tube *q*, et qui représente le volume de l'azote amené dans la bouteille M. On peut même faire plusieurs déterminations successives d'azote dans le cours de la même analyse. Il faut attendre que la distribution du gaz dans l'appareil soit devenue ce qu'elle doit être jusqu'à la fin de l'expérience, car si l'on commençait lorsque tous les tubes sont encore remplis d'azote, il est évident qu'on aurait des résultats fautifs. Lorsqu'on a recueilli l'eau écoulée, on mesure la différence de hauteur entre le niveau de l'eau dans la bouteille, et l'extrémité du tube *q*. On tient compte de la tension maximum de la vapeur d'eau à la température à laquelle on opère, etc.

On pourrait aussi recueillir l'azote sous une cloche graduée au moyen d'un tube recourbé, mais cette disposition aurait l'inconvénient d'augmenter la tension du gaz dans le gazomètre et dans l'appareil, et, d'un autre côté, l'emploi de la bouteille M est très-commode pour aspirer de l'azote au commencement et à la fin de l'expérience.

L'azote n'a été déterminé directement que dans un certain nombre d'expériences, principalement à la fin de mon travail. Ce moyen m'a servi de contrôle et de vérification pour mes analyses.

Le gazomètre à mercure que j'ai décrit plus haut, peut être remplacé par une disposition plus simple indiquée ci-dessous. On fait communiquer directement la bouteille E avec le système de robinet *s*, *s'*, *s''*. Pour obliger le gaz à sortir de l'appareil d'aspiration, on met la tubulure inférieure en communication avec un vase de Mariotte V, au moyen du tube deux fois recourbé *i*. Un petit robinet est placé sur le tube *o*. Il suffit que le vase V soit jaugé exactement pour qu'on puisse apprécier le volume du gaz qu'on a fait sortir de la bouteille E, et cela peut se faire avec précision en employant un vase V rétréci dans le haut et dans le bas, aux points où se trouvent les traits de jauge. Les analyses pourraient aisément se faire sur 4 à 5 litres de gaz.



On peut aussi maintenir fermée la tubulure inférieure, et introduire l'eau par un tube droit surmonté d'un entonnoir qui traverserait le bouchon de la tubulure supérieure, et qui plongerait jusqu'au fond de la bouteille. Le poids ou le volume de l'eau introduite permet de calculer le volume du gaz écoulé. On conduira, au reste, dans les deux cas l'opération comme je l'ai décrit tout à l'heure, sans rien changer au surplus de l'appareil.

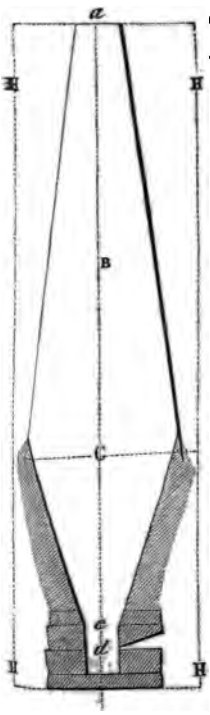
Cette disposition est beaucoup plus simple et moins dispendieuse que celle que j'ai primitivement décrite, et, sans doute, elle sera préférée dans le plus grand nombre des cas. On n'a à craindre que l'altération qui pourrait résulter, dans la composition du gaz, de son contact prolongé avec la

couche huileuse, et j'ai déjà dit plus haut que, d'après plusieurs expériences, cette altération m'avait paru insensible après quelques heures de séjour du gaz dans la bouteille.

Composition des gaz qui se produisent dans les hauts fourneaux à diverses hauteurs au-dessous du gueulard.

Analyse des gaz du haut fourneau de Clerval.

Les dimensions du haut fourneau de Clerval sont aujourd'hui un peu différentes de celles qu'il avait lors des expériences que j'y ai faites en juin 1839. J'indique celles de ces dimensions qui pourraient être utiles pour l'intelligence des résultats des analyses :



	m
Diamètre au gueulard *a*..	0,67
Hauteur de la cuve B.....	5,67
Diamètre au ventre C.....	2,16
Hauteur des étalages..	2,12
Diamètre de l'ouvrage au raccordement avec les étalages *e*....	0,62
Hauteur de l'ouvrage.....	0,44
Largeur devant la tuyère *d* ...	0,44
Hauteur totale du fourneau H...	8,67
Du fond du creuset au ventre...	3,00

Marche du haut fourneau. — Le haut fourneau marche au vent chaud. Sa température était de 175 à 190 degrés centigrades. La buse a $0^m,065$ de diamètre. La pression du vent était très-faible, et comprise généralement entre $0^m,015$ et $0^m,018$ de mercure.

Pendant la durée de mes expériences, la charge se composait de :

	m.c	
Charbon.....	0,500 pesant	115 kil.
Castine.....	0,020	29
Minerais en grains.....	0,110	198
Minerai calcaire de Laissey (Doubs)....	$0^{m.c}$,050 à 0,060	89 à 107

On coule toutes les vingt charges.

Nature du minerai. — Les minerais en grains viennent de la Haute-Saône; d'après leur composition et celle du minerai de Laissey, on peut admettre pour la composition proximative du lit de fusion, y compris la castine :

Eau.....	0,125
Carbonate de chaux.....	0,210
Peroxyde de fer.....	0,392
Oxyde de manganèse...	0,007
Silice.....	0,200
Alumine.....	0,066
	1,000

Résultat qui peut s'exprimer de la manière suivante :

Fer métallique.....		0,272
Matières entraînées par le gaz 0,337	Oxygène	0,120
	Eau.....	0,125
	Acide carbonique.	0,092
Matières fixes 0,391.	Silice.....	0,200
	Alumine.....	0,066
	Chaux.....	0,118
	Oxyde de mangan.	0,007
		1,000

Nature du charbon. — Le charbon employé renferme moyennement 8 pour 100 d'humidité, et la composition élémentaire du charbon sec est celle déjà donnée p. 229 :

Carbone.....	88,00
Hydrogène.....	3,00
Oxygène.....	6,00
Cendres.....	3,00
	100,00

Il donne à la distillation 13 pour 100 environ de matières volatiles formées de :

Hydrogène.....	3,0
Oxygène.....	6,0
Carbone.....	4,0
	13,0

Ces matières volatiles se représentent à peu près exactement par un mélange d'hydrogène et d'oxyde de carbone.

Consommations et produits.—Pendant le mois de septembre 1841, le fourneau de Clerval a consommé :

m.c		kilogrammes.
391,05	charbon de bois.....	96,045
15,52	castine.....	22,700
85,89	minerai en grains.....	154,800
44,25	minerai calcaire.....	78,800

Il a produit :

	kilogrammes.	
	19,475	gueuses.
	13,685	sapots pour 2e fusion.
	17,021	sableries et moulages.
	10,989	bocages pour le cubilot.
Total....	61,170	de fonte.

Il suit de là que la charge a produit en moyenne 78^{kil},10 de fonte.

1 de fonte a consommé 1,48 de charbon en poids et 3,81 de minerai.

1 de minerai a produit 0,262 de fonte.

1 de minerai a consommé 0,388 de charbon.

Le roulement du fourneau est beaucoup moins avanta-

geux que celui de la même usine en juin 1839. On attribue ce résultat à la faiblesse du vent. La fonte obtenue a été presque constamment grise.

Pour prendre les gaz depuis le gueulard jusqu'à la base de la cuve, je me suis servi de tuyaux en fonte, de $0^m,10$ de diamètre environ, qu'on assemblait avec des clavettes. On faisait descendre dans le fourneau la colonne des tuyaux jusqu'à la profondeur voulue. Un tuyau coudé, ajusté à l'extrémité de la colonne, amenait le gaz à la portée de l'appareil. Dans toutes les expériences faites sur les gaz pris dans la cuve du fourneau de Clerval, le gazomètre était placé tout près du gueulard, et le gaz y arrivait directement après s'être desséché en passant sur de l'acide sulfurique concentré.

Les gaz ne sortaient pas toujours du tuyau de fonte avec une égale vitesse; je ne les prenais, pour en faire l'analyse, que quand la force du courant prouvait qu'ils venaient bien de l'orifice inférieur de la colonne de tuyaux.

Expérience N° 1.

Gaz pris à ras du gueulard. — On a obtenu les nombres suivants :

Gaz pour l'analyse		$1^{lit},325$
Température		25°
Baromètre		$0^m,747$
Gaz ramené à 0° et à $0^m,760$		$1^{lit},194$
		gr
Acide carbonique		0,284
Produits de la combustion.	Eau	0,055
	Acide carbonique	0,576
	Oxygène absorbé	0,254

En comparant les nombres qui représentent les produits de la combustion avec celui qui donne l'oxygène absorbé, il est facile de voir que les gaz combustibles ne renferment que de l'oxyde de carbone et de l'hydrogène, sans mélange

d'hydrogène carboné. En effet, $0^{gr},576$ d'acide carbonique renferment, d'après MM. Dumas et Stass, les $\frac{8}{11}$ de leur poids d'oxygène, dont la moitié $0^{gr},209$, a été employée à transformer l'oxyde de carbone en acide carbonique; il reste $0^{gr},045$ d'oxygène pour $0^{gr},055$ d'eau recueillie. La quantité d'oxygène trouvée ne suffit pas tout à fait pour transformer l'hydrogène et l'oxyde de carbone en eau et en acide carbonique; à plus forte raison serait-elle insuffisante si l'on admettait dans le gaz de l'hydrogène carboné.

Pour calculer les résultats donnés par l'expérience, j'ai admis que

1 litre d'acide carbonique pesait.....	$1^{gr},980$
1 litre de vapeur d'eau.....	$0^{gr},807$

L'acide carbonique et la vapeur d'eau correspondent à des volumes égaux aux leurs d'oxyde de carbone et d'hydrogène.

En partant de ces données, on trouve pour la composition du gaz sec :

Acide carbonique.....	12,01
Oxyde de carbone.....	24,36
Hydrogène.....	5,71
Azote.....	57,92
	100,00

Expérience N° 2.

Gaz pris à ras du gueulard. — Le gaz a été pris à charge basse.

Volume du gaz.....		$1^{lit},403$
Thermomètre.....		24°
Baromètre.....		$0^{m},748$
Gaz ramené à 0° et à $0^{m},760$...		$1^{lit},277$
Acide carbonique.....		$0^{gr},325$
Produits de la combustion.	Acide carbonique..	0,593
	Eau.....	0,062
	Oxygène.....	0,267

On voit, comme dans l'expérience précédente, (gaz combustibles ne se composent que d'oxyde de (et d'hydrogène. La composition du gaz sec dédı nombres qui précèdent, est la suivante :

Acide carbonique.....	12,85
Oxyde de carbone.....	23,49
Hydrogène.....	6,01
Azote.....	57,65
	100,00

Dans la même expérience, on a recueilli dans le acide sulfurique :

Volume du gaz sec.....	2^{lit},770
Eau..... ..	0^{gr},208

Les 2^{lit},770 ramenés 0° et à 0^{m},760 se réduisent à 2li
Volume de vapeur d'eau correspondant à 100 volumes de gaz sec..... 10,

Expérience N° 3.

Gaz pris à ras du gueulard, à charge basse. — dosé dans cette expérience que la vapeur d'eau et carbonique :

Gaz.....	1^{lit},514
Température..	30°
Baromètre.....	0^{m},741
Gaz ramené à 0° et à 0^{m},760.	1^{lit},328
Acide carbonique.....	0^{gr},351
Gaz pour la vapeur d'eau...	2^{lit},610
Ramené à 0° et à 0^{m},760...	2^{lit},292
Eau recueillie.....	0^{gr},204

Acide carbonique pour 100 vol. de gaz sec..... 13
Vapeur d'eau correspondant à 100 vol. gaz sec.. 11

Expérience N° 4.

Gaz pris à ras du gueulard. — Le gaz a été pris à haute.

Gaz pour la vapeur d'eau.....		$2^{lit},307$
Température.....		24°
Baromètre.....		$0^{m},738$
Ramené à 0° et à $0^{m},760$.....		$2^{lit},062$
Eau recueillie.....		$0^{gr},263$
Gaz pour l'analyse.....		$1^{lit},596$
Ramené à 0° et à $0^{m},760$.....		$1^{lit},428$
		^{gr}
Acide carbonique.....		0,376
Produits de la combustion.	Eau.....	0,069
	Acide carbonique.	0,643
	Oxygène.....	0,290

On tire de là :

Acide carbonique.....	13,33
Oxyde de carbone.....	22,79
Hydrogène.....	5,82
Azote.....	58,06
	100,00

Vapeur d'eau correspondant à 100 vol. gaz sec.. 15,80

Expérience N° 5.

Gaz pris à ras du gueulard. — Le gaz a été pris quinze jours après les analyses qui précèdent, et au moyen de la bouteille d'aspiration à couche d'huile.

Gaz pour l'analyse.....		$1^{lit},536$
Température.....		18°,5
Baromètre.....		$0^{m},735$
Gaz ramené à 0° et à $0^{m},760$....		$1^{lit},378$
		^{gr}
Acide carbonique.....		0,352
Produits de la combustion.	Eau.....	0,064
	Acide carbonique.	0,640
	Oxygène $0^{gr},278$ (ce nombre est un peu faible).	

L'oxygène correspondant à l'oxyde de carbone et à l'hydrogène indiqués par les nombres précédents serait représenté par $0^{gr},290$.

On tire des nombres précédents, pour la compositio gaz :

Acide carbonique	12,89
Oxyde de carbone	23,44
Hydrogène	5,75
Azote	57,92
	100,00

Expérience N° 6.

Dans les essais qui suivent, j'ai cherché à apprécie variations dans la proportion de vapeur d'eau cont dans les gaz aux différentes époques de la charge.

A. Gaz pris à charge haute. Le fourneau est entièrement re

Volume du gaz sec	$1^{lit},560$
Thermomètre	32°
Baromètre	$0^{m},747$
Gaz à 0° et à $0^{m},760$	$1^{lit},372$
Eau recueillie	$0^{gr},14$
Vapeur d'eau pour 100 volumes de gaz sec	13

B. Gaz pris à la suite du précédent, la charge étant à 1^{m}, *profondeur au-dessous du gueulard.*

Volume du gaz sec	$1^{lit},610$
Température	32°
Baromètre	$0^{m},747$
Eau recueillie	$0^{gr},125$
Vapeur d'eau pour 100 volumes de gaz sec	10

C. Gaz pris à charge haute. Le tube d'aspiration repose minerai.

Volume du gaz sec	$1^{lit},680$
Thermomètre	30°
Baromètre	$0^{m},747$
Gaz à 0° et à $0^{m},760$	$1^{lit},487$
Eau recueillie	$0^{gr},175$
Vapeur d'eau pour 100 volumes de gaz sec	14

D. *Pris à charge basse.*

Volume du gaz	$1^{lit},550$	
Température	30°	
Baromètre	$0^{m},744$	
Gaz à 0° et à $0^{m},760$	$1^{lit},364$	
Eau	$0^{gr},060$	
Vapeur d'eau pour 100 volumes de gaz sec		5,45

E. *Pris à charge haute après le précédent.*

Volume du gaz sec	$1^{lit},470$	
Température	30°	
Baromètre	$0^{m},744$	
Gaz ramené à 0° et à $0^{m},760$	$1^{lit},296$	
Eau recueillie	$0^{gr},148$	
Vapeur d'eau pour 100 volumes de gaz sec		14,14

Le jour où les deux dernières expériences ont été faites, la flamme du fourneau à charge basse paraissait plus chaude qu'à l'ordinaire.

Je récapitule dans le tableau suivant les résultats de toutes les expériences faites sur les gaz à leur sortie du haut fourneau.

On observe des variations sensibles dans les proportions respectives d'acide carbonique et d'oxyde de carbone, mais il est facile de s'assurer que la somme des volumes des deux gaz reste constante. Comme l'oxyde de carbone produit en brûlant un volume égal au sien d'acide carbonique, on voit que la quantité de carbone contenue dans le gaz reste invariable. La proportion d'oxygène combiné dans le courant gazeux est le seul élément qui éprouve quelque changement.

	(1)	(2)	(3)	(4)	[illegible]	[illegible]	(B)	(C)	(D)	(E)	MOYENNE.
Acide carbonique..	12,01	12,85	13,34	13,33	12,89	»	»	»	»	»	12,88
Oxyde de carbone.	24,36	23,49	»	22,79	23,44	»	»	»	»	»	23,51
Hydrogène.....	5,71	6,01	»	5,82	5,75	»	»	»	»	»	5,82
Azote.....	57,92	57,65	»	58,06	57,92	»	»	»	»	»	57,79
Totaux...	100,00	100,00	»	100,00	100,00	»	»	»	»	»	100,00
Vapeur d'eau sur 100 vol. gaz sec..	»	10,28 charge basse.	11,02 charge basse.	15,82 charge haute.	»	13,00 charge haute.	10,93 charge basse.	14,58 charge haute.	5,45 charge basse.	14,14 charge haute.	»

Moyennes pour la vapeur d'eau sur 100 volumes de gaz sec.... { Charge haute..... 14,38 / Charge basse..... 9,42 }

L'examen du tableau précédent conduit aux conclusions suivantes.

1°. La proportion d'eau contenue dans le gaz varie dans des limites assez étendues aux différentes époques de la charge. Elle atteint son maximum au moment où l'on vient de charger le minerai. L'expulsion de l'eau des minerais est d'autant plus rapide que la quantité de chaleur sensible que possède le courant de gaz est plus considérable, et cette quantité varie avec l'allure du fourneau.

2°. La proportion de l'hydrogène et celle de l'azote paraissent à peu près constantes.

Expérience N° 7.

Gaz pris au-dessous du gueulard. — Le gaz est pris à $1^m,33$ au-dessous du niveau du gueulard, un peu après la charge.

Gaz pour l'eau		$2^{lit},280$
Température		23°
Baromètre		$0^m,747$
Gaz ramené à 0° et à $0^m,760$		$2^{lit},067$
Eau recueillie		$0^{gr},224$
Gaz pour l'analyse		$1^{lit},428$
Ramené à 0° et à $0^m,760$		$1^{lit},298$
		gr
Acide carbonique		0,359
Produits de la combustion.	Eau	0,063
	Acide carbonique	0,572
	Oxygène absorbé	0,259

On tire de là :

Acide carbonique	13,96
Oxyde de carbone	22,24
Hydrogène	6,00
Azote	57,80
	100,00

Vapeur d'eau pour 100 volumes de gaz sec... 13,41

Expérience N° 8.

Gaz pris à $2^m,67$ *au-dessous du gueulard.* — L'expérience a été faite pendant que le fondeur travaillait à la tuyère se perdait une partie du vent.

Gaz pour l'eau	$3^{lit},400$
Température	25°
Baromètre	$0^m,744$
Gaz ramené à 0° et à $0^m,760$	$3^{lit},051$
Eau recueillie	$0^{gr},087$
Gaz pour l'analyse	$2^{lit},623$
Ramené à 0° et à $0^m,760$	$2^{lit},362$
	gr
Acide carbonique	0,642
Produits de la combustion. Eau	0,113
Acide carbonique	1,173
Oxygène absorbé	0,525

L'oxygène se répartit ainsi :

	gr
Oxygène pour l'acide carbonique	0,426
Oxygène pour l'eau	0,099

On tire de ces nombres :

Acide carbonique	13,72
Oxyde de carbone	25,08
Hydrogène	5,94
Azote	55,26
	100,00

Vapeur d'eau pour 100 volumes de gaz sec. . 3,53

Expérience N° 9.

Gaz pris à $2^m,67$ *du gueulard.* — On n'a dosé dans cette expérience que l'eau et l'acide carbonique.

Gaz pour l'eau	$3^{lit},450$
Thermomètre	24°
Baromètre	$0^m,744$
Gaz ramené à 0° et à $0^m,760$	$3^{lit},098$

Eau condensée	$0^{gr},044$	
Gaz pour l'acide carbonique	$2^{lit},497$	
Ramené à 0° et à $0^{m},760$	$2^{lit},274$	
Acide carbonique	$0^{gr},606$	
Acide carbonique pour 100 volumes de gaz sec		13,48
Vapeur d'eau pour 100 volumes de gaz sec		1,77

Expérience N° 10.

Gaz pris à $2^{m},67$ *du gueulard.* — On a obtenu :

Gaz pour l'eau	$2^{lit},360$
Thermomètre	25°
Baromètre	$0^{m},741$
Gaz à 0° et à $0^{m},760$	$2^{lit},133$
Eau condensée par l'acide sulf.	$0^{gr},045$
Gaz pour l'analyse	$1^{lit},530$
Ramené à 0° et à $0^{m},760$	$1^{lit},367$
Acide carbonique	$0^{gr},380$
Produits de la combustion. Eau	0,060
Produits de la combustion. Acide carbonique	0,613
Produits de la combustion. Oxygène absorbé	0,278

Ces nombres donnent :

Acide carbonique	14,04
Oxyde de carbone	22,65
Hydrogène	5,44
Azote	57,87
	100,00
Vapeur d'eau pour 100 volumes de gaz sec	2,60

Je réunis dans le tableau suivant les résultats des expériences (8), (9), (10), faites sur le gaz pris à $2^{m},67$ de profondeur.

Les expériences de cette série ne donnent pas des résultats aussi concordants que celles faites sur les gaz pris au gueulard. Dans l'expérience (8), la proportion d'oxyde de carbone s'élève très-notablement au-dessus de la moyenne.

J'essayerai plus tard d'expliquer la cause de cette composition un peu anomale.

	(8)	(9)	(10)	MOYENNES.
Acide carbonique	13,72	13,48	14,04	13,74
Oxyde de carbone	25,08	»	22,65	23,86
Hydrogène	5,94	»	5,44	5,69
Azote	55,26	»	57,87	56,71
Totaux	100,00	»	100,00	100,00
Vapeur d'eau pour 100 vol. gaz sec	3,53	1,77	2,60	2,63

Expérience N° 11.

Gaz pris à 4 mètres de profondeur. — L'expérience a donné :

Gaz pour l'eau	$3^{lit},060$
Thermomètre	25°
Baromètre	$0^{m},738$
Gaz ramené à 0° et à $0^{m},760$	$2^{lit},723$
Eau condensée	$0^{gr},021$
Gaz pour l'analyse	$1^{lit},530$
Ramené à 0° et à $0^{m},760$	$1^{lit},361$
Acide carbonique	$0^{gr},239$
Produits de la combustion. Eau	0,042
Produits de la combustion. Acide carboniq.	0,760

L'oxygène absorbé dans la combustion n'a pas été dosé, mais, d'après les résultats obtenus plus haut, on peut admettre que l'hydrogène existe à l'état de liberté dans le gaz.

La composition du gaz est la suivante :

Acide carbonique.....	8,86
Oxyde de carbone.....	28,18
Hydrogène.....	3,82
Azote.....	59,14
	100,00

Vapeur d'eau pour 100 volumes de gaz sec.... 0,95

Expérience N° 12.

Gaz pris à 5^m,33 *du gueulard.* — On a obtenu :

Gaz pour l'eau.....	2^{lit},400
Baromètre.....	0^m,740
Thermomètre.....	35°
Gaz ramené à 0° et à 0^m,760..	2^{lit},070
Eau recueillie.....	0^{gr},007
Gaz pour l'analyse.....	1^{lit},599
Ramené à 0° et à 0^m,760.....	1^{lit},380
	gr
Acide carbonique.....	0,061
Produits de la combustion. Eau.....	0,040
Produits de la combustion. Acide carbonique.	0,920
Produits de la combustion. Oxygène absorbé.	0,372

L'oxygène absorbé pour faire de l'acide carbonique s'élève aux $\frac{4}{11}$ du poids de l'acide carbonique trouvé = 0,335.

Ces nombres donnent :

Acide carbonique.....	2,23
Oxyde de carbone.....	33,64
Hydrogène.....	3,59
Azote.....	60,54
	100,00

Vapeur d'eau sur 100 volumes de gaz sec..... 0,42

Expériences N°s 13 *à* 16.

Gaz pris au sommet des étalages. — Pour analyser les gaz provenant de la partie du fourneau qu'on appelle le grand

ventre, à la rencontre des deux troncs de cône dont l'un forme la cuve et l'autre les étalages, j'ai profité d'une ouverture qui avait été réservée dans la maçonnerie lors du remontage du fourneau, et dans laquelle on avait placé un tuyau en fonte débouchant à l'extérieur. Un tuyau en cuivre, muni d'un robinet et adapté au conduit en fonte, amenait le gaz près de la cuve à mercure. Le gaz s'échappait avec bruit par le tuyau; son odeur était nauséabonde et rappelait un peu celle de l'arsenic. Les gaz pris dans les parties inférieures du fourneau, soit à Audincourt, soit à Clerval, avaient constamment cette odeur.

En allumant le gaz qui se dégage par le tuyau de cuivre, on a une flamme bleue, à bords rouges, d'une grande intensité.

J'ai fait quatre analyses de ce gaz. Voici les données de ces expériences :

		(13)	(14)	(15)	(16)
Gaz pour l'analyse		lit 1,574	lit 1,585	lit 1,589	lit 1,558
Baromètre		m 0,736	m 0,736	m 0,734	m 0,733
Thermomètre		24°	21°,6	20°	19°,2
Gaz à 0° et à 0^m,760		lit 1,402	lit 1,4187	lit 1,430	lit 1,404
Acide carbonique		gr 0,000	gr 0,002	gr 0,002	gr 0,003
Produits de la combustion.	Eau	0,018	0,023	0,023	0,024
	Acide carbonique	0,986	0,978	0,988	0,968
	Oxygène absorbé	»	0,385	»	»
Eau condensée		»	»	»	0,006
Gaz correspondant		»	»	»	lit 2,943
Gaz ramené à 0° et à 0^m,760		»	»	»	2,650

Si l'on fait abstraction des traces de vapeur d'eau et d'acide carbonique données par l'analyse, on trouve que la composition du gaz dans les quatre expériences qui précèdent est la suivante :

	(13)	(14)	(15)	(16)	MOYENNES.
Oxyde de carbone...	35,51	34,82	34,89	34,81	35,01
Hydrogène.....	1,59	2,00	1,98	2,12	1,92
Azote.....	62,90	63,18	63,13	63,07	63,07
Totaux....	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Ces expériences, et surtout les trois dernières, présentent des résultats remarquablement concordants, et qui tendent à prouver que dans cette partie du fourneau la composition du gaz est tout à fait constante.

Expériences N°s 17 *à* 21.

Gaz pris dans l'ouvrage, au contrevent et à $0^m,44$ *au-dessus de la tuyère.* — A cette hauteur se trouve la séparation entre l'ouvrage et les étalages.

On a percé au fleuret un trou dans la maçonnerie, et l'on a introduit dans cet orifice un tube de porcelaine d'un petit diamètre. Le gaz sortait du tuyau avec une grande vitesse, et brûlait à l'extrémité avec une flamme blanche à bords bleuâtres, très-éclatante, qui déposait de l'oxyde de zinc sur les corps froids. Le tube, laissé dans le trou après l'expérience, s'est obstrué complétement par du zinc métallique au bout d'une demi-heure.

J'ai employé, pour prendre le gaz, la bouteille d'aspiration à couche huileuse, que j'ai décrite plus haut. Voici les données et les résultats de cinq expériences :

	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)
Gaz pour l'analyse.....	lit 1,520	lit 1,477	lit 1,402	lit 1,425	lit 1,341
Thermomètre.....	18°,5	15°	18°,5	20°	21°
Baromètre.....	m 0,735	m 0,734	m 0,734	m 0,732	m 0,732
Gaz ramené à 0° et à 0m,760.	lit 1,377	lit 1,340	lit 1,268	lit 1,279	lit 1,200
Acide carbonique.....	gr 0,026	gr 0,003	gr 0,000	gr 0,006	gr 0,005
Produits de la combustion. Eau.....	0,016	0,017	0,018	0,012	0,013
Produits de la combustion. Ac. carboniq.	1,132	1,063	1,010	1,084	1,036
Produits de la combustion. Oxygène.....	»	0,393	»	»	»

Le gaz (19) est le même que (18); il est resté trois heures de plus dans la bouteille d'aspiration.

Le gaz (21) est le même que (20), il est resté quatre heures de plus dans la bouteille d'aspiration.

Les nombres qui précèdent conduisent à la composition suivante :

	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)	MOYENNES.
Acide carbonique.	0,95	0,12	0,00	0,25	0,25	0,31
Oxyde de carbone.	41,51	40,06	40,22	42,80	43,36	41,59
Hydrogène.....	1,43	1,50	1,55	1,25	1,36	1,42
Azote.....	56,11	58,42	58,23	55,70	55,04	56,68
Totaux...	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Ces analyses ne sont pas aussi concordantes que celles des gaz pris au-dessus des étalages. Je chercherai à déterminer

ıses de ces différences de composition, lorsque je .rerai les unes aux autres les compositions des gaz pris rses hauteurs.

Expérience N° 22.

pris sous la tympe. — Pour aspirer le gaz dans cette du fourneau, qui est, comme on sait, celle par où t les laitiers, j'ai introduit sous la pierre de tympe ɔe de porcelaine renfermé dans un canon de fusil. Le .'aspiration plongeait dans l'extrémité du tube de fer, ımuniquait directement avec le gazomètre à mercure. les résultats d'une seule expérience :

Gaz pour l'analyse.....	$1^{lit},556$
Température.....	22°
Baromètre.....	$0^{m},734$
Gaz ramené à 0° et à $0^{m},760$....	$1^{lit},388$
	gr
Acide carbonique.....	0,000
Produits de la combustion. { Eau.....	0,014
Produits de la combustion. { Acide carbonique.	1,411

déduit de là pour la composition du gaz :

Oxyde de carbone.....	51,35
Hydrogène.....	1,25
Azote.....	47,40
	100,00

canon de fusil, quand on le retire, est chauffé au :, mais le tube de porcelaine qu'il renferme n'est pas mé.

Expérience N° 23.

z pris à l'ouverture de la tuyère. — Les expériences qui ɔdent ayant établi qu'il n'existait que des traces d'acide ɔnique dans les gaz des parties inférieures du four-, j'ai cherché à déterminer directement la composition az produit devant la tuyère par l'action de l'air sur

le charbon. J'ai éprouvé, pour avoir du gaz dans cette partie du fourneau, de très-grandes difficultés. La chaleur produite est tellement intense, que des canons de fusil y sont brûlés ou fondus dans l'espace d'une à deux minutes. Les tubes en porcelaine ne résistent pas mieux, et fondent complétement en très-peu de temps, lorsqu'ils n'éclatent pas sous la première impression de la chaleur.

Je me suis servi d'un tube en porcelaine d'un petit diamètre, qui a été recouvert d'une couche légère de terre réfractaire. Après le recuit, le tube, ainsi luté, a été placé dans un canon de fusil très-épais, qu'on a luté de la même manière que le tube de porcelaine. Pour introduire ce double tube dans le fourneau, il est nécessaire d'arrêter le vent, sans quoi on n'aurait pas le temps de prendre le gaz. Le tube étant mis en place et en saillie de $0^m,60$ hors du fourneau, on y fait plonger un tube droit qui communique avec la bouteille d'aspiration. On met celle-ci dans un vase contenant de l'eau, on enlève le bouchon de la tubulure inférieure, et l'on dispose tout pour qu'il suffise de tourner le robinet pour introduire le gaz. Au moment où l'on rend le vent au fourneau, on ouvre le robinet, et la bouteille est remplie en quelques secondes. Le courant de gaz sort par le tube avec une très-grande vitesse, en projetant tout l'entour du laitier et de la fonte incandescente : en moins de deux minutes, toute la partie du double tuyau engagée dans le fourneau se fond.

Je n'ai pu réussir au fourneau de Clerval que dans une seule expérience, dont les résultats sont encore assez incomplets.

Le tuyau avait été enfoncé de $0^m,12$ dans la tuyère.

Gaz.....	$1^{lit},530$
Baromètre.....	$0^m,732$
Thermomètre.....	14°
Gaz ramené à 0° et à $0^m,760$..	$1^{lit},400$

		gr
Acide carbonique		0,074
Produits de la combustion.	Eau	0,000
	Acide carboniq.	0,002

En regardant comme accidentelle la petite quantité d'acide carbonique obtenue dans la combustion, on trouve, pour la composition du gaz :

Acide carbonique	2,67
Oxygène et azote	97,33
	100,00

On voit déjà, par cette expérience, que le premier produit de l'action de l'air sur le charbon est de l'acide carbonique. Des expériences faites à Audincourt, et dont je donnerai ci-après les résultats, sont plus concluantes, et conduisent aux mêmes conséquences.

Analyse des gaz du haut fourneau d'Audincourt.

La figure ci-après représente le plan du haut fourneau d'Audincourt, pris à la hauteur de la tuyère ; les *fig.* 2 et 3 représentent deux coupes verticales du même fourneau, l'une passant par la tuyère et l'axe du fourneau, l'autre suivant un plan perpendiculaire à ce dernier, de la tympe à la rustine.

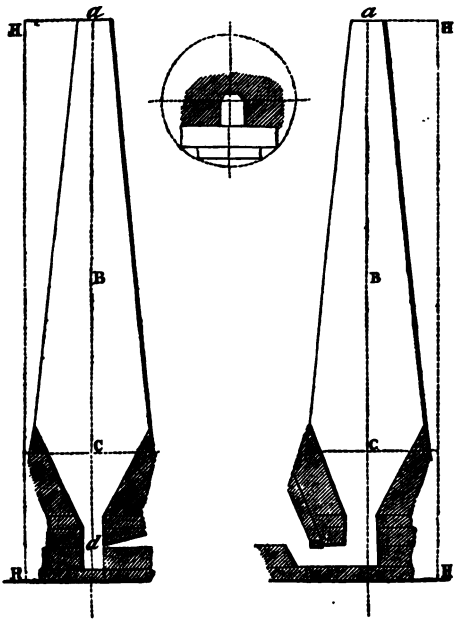
Voici les dimensions principales de l'appareil :

	m
Hauteur totale H	11,00
Hauteur de la cuve B	8,67
Diamètre au gueulard *a*	0,66
Diamètre au ventre C	2,33
Largeur de l'ouvrage *d* (De la tuyère au contrevent.)	0,45

Marche du haut fourneau. — Le haut fourneau marche au vent chaud ; la température de l'air est assez constante, et s'élève à 250 degrés. La pression du vent est comprise

entre 0,95 et 1^{m},00 d'eau (0^{m},070 à 0^{m},074 de merc
La surface de la base est de 32 centimètres carrés

Fig. 1. *Fig.* 3. *Fig.* 2.



Consommations et produits. — (Octobre 1841.) La ch
se compose de :

400	litres charbon de bois, pesant..... ...	92 ki
0st,33,	bois (1), pesant.....	115
100	litres braise, pesant.....	18
20	litres castine, pesant.....	33
35	litres scories de forges concassées, pesant.	77
60	litres minerai calcaire de Chamesol, pesant	90
105	litres minerais en grains mélangé, pesant.	168

On substitue de temps à autre 0st,11 de bois à 1 he

(1) Le bois est pris sur le port d'Audincourt, où il arrive par le flo
On le scie en bouts de 0^{m} 5 de longueu pour le jeter dans le fourne
ne subit aucune autre préparation. Il y en général très-peu de petit b

litre de charbon. On opère cette substitution sans rien changer au reste de la charge, lorsque le fourneau a une allure un peu trop chaude; le fourneau se refroidit alors progressivement. Quand la fonte devient d'un gris clair, après huit ou dix jours de ce roulement, on remplace de nouveau $0^{st},11$ de bois par 1 hectolitre de charbon.

Le haut fourneau a été remis en feu en février 1841; il ne fabrique guère que des fontes d'affinage. Voici, dans une période de vingt-huit jours, du 1er au 28 octobre 1841, quels ont été les résultats de son roulement :

Nombre de charges. 792

Charbon.....	2,580	hect.	pesant	59,340 kil.
Braise.....	792	hect.	—	14,256
Bois.....	326	stères	—	114,160
Castine.....	160	hect.	—	26,400
Scories de forges.	277	hect.	—	60,940
Minerai Chamesol.	475	hect.	—	71,250
Minerais en grains.	855	hect.	—	136,800
Produit en fonte..				90,506

La mise au millier est de :

	m.c
Bois.....	3,600
Charbon.....	2,850
Braise.....	0,875
	hect
Castine.....	1,77
Crasses de forges.....	3,05
Minerai de Chamesol.....	5,25
Minerai en grains.....	9,43

La charge a produit en moyenne $114^{kil},2$ de fonte.

1 de minerai, scorie et castine a produit 0,306 de fonte.

On admet à Audincourt, pour comparer les résultats du roulement précédent à ceux où l'on n'emploie que du charbon, que le bois équivaut au tiers, et la braise à la moitié de son volume de charbon. En partant de ces données, on trouve que la consommation de charbon rapportée aux

1,000 kilogrammes de fonte produite serait de $4^{m.c}$,49, ou en poids 1,032 kilogrammes.

Le lit de fusion contient approximativement :

Eau	9,7
Carbonate de chaux	22,0
Peroxyde de fer	26,5
Protoxyde de fer	15,5
Oxyde de manganèse	0,9
Silice	20,0
Alumine	5,4
	100,0

ou, ce qui est la même chose :

	Fer métallique	30,4
Matières volatiles 31,0.	Oxygène	11,6
	Eau	9,7
	Acide carbonique	9,7
Matières fixes 38,6.	Silice	20,0
	Alumine	5,4
	Chaux	12,3
	Protoxyde de manganèse	0,9
		100,0

Avant de commencer à Audincourt des expériences s
blables à celles que je venais de terminer à Clerval,
cherché à déterminer les altérations qu'éprouve le boi
nature en descendant dans la cuve. Des expériences
en 1837 au fourneau de Vellexon (p. 172) m'a
appris que le bois se carbonisait tout entier dans ur
taine zone du haut fourneau de 0^{m},60 à 1 mètre de h
et que dans toute la partie de la cuve supérieure à ce
la chaleur était insuffisante pour opérer la dessicc
bois et l'expulsion de l'eau des minerais. Les résu
j'ai obtenus à Audincourt sont tout à fait d'accor
précédents. Dans une première expérience, la cloc
percée de trous et contenant du bois en nature, d
et des minerais, a été placée au bout d'une tig

jetée dans le fourneau, d'où elle a été retirée à la profondeur de 3 mètres, et après sept quarts d'heure de séjour. En ouvrant la cloche, après sa sortie du fourneau, j'ai trouvé que les morceaux de bois avaient absolument le même aspect que lors de leur introduction. Les minerais avaient encore leur eau de mouillage. La température du courant de gaz est donc très-faible dans toute la partie supérieure du fourneau.

Dans une seconde expérience, la cloche, renfermant les mêmes matières que dans la précédente, est restée trois heures un quart dans le fourneau, et en a été retirée à la profondeur de 4 mètres. Le bois est complétement carbonisé. Le charbon obtenu est en petits fragments et brûle sans flamme. Les minerais sont devenus magnétiques : leur poussière est noire. Ils ont perdu toute leur eau de combinaison et une partie de leur oxygène.

On voit donc que la carbonisation du bois en nature s'opère à Audincourt d'une manière complète sur une hauteur de moins de 1 mètre, et dans un temps fort court qui ne paraît pas depasser une heure et demie. La zone de la carbonisation est située entre 3 et 4 mètres au-dessous du gueulard. Il était essentiel d'en déterminer la position, pour pouvoir apprécier l'influence des produits de la distillation du bois sur la composition du courant de gaz.

J'ai employé, pour avoir du gaz provenant de diverses hauteurs dans la cuve, les mêmes moyens qu'à Clerval, c'est-à-dire une colonne de tuyaux en fonte assemblés les uns aux autres jusqu'à la profondeur voulue. Les gaz pris au-dessous de la profondeur de $6^{m},67$ à partir du gueulard, l'ont été par des ouvertures pratiquées dans la maçonnerie du fourneau.

Je me suis servi dans toutes les analyses de la bouteille d'aspiration à couche d'huile pour recueillir le gaz. Le gazomètre à mercure et les appareils pour l'analyse étaient placés dans une pièce voisine du haut fourneau.

Expérience N° 24.

Gaz pris au niveau du gueulard. — Le gaz est pris à ch haute.

Gaz pour l'analyse		$1^{lit},590$
Température		15°,5
Baromètre		$0^{m},733$
Gaz ramené à 0° et à $0^{m},760$		$1^{lit},451$
Acide carbonique		$^{gr}0,325$
Produits de la combustion.	Eau	0,075
	Acide carbonique	0,743
	Oxygène absorbé	0,323

Expérience N° 25.

Gaz pris au niveau du gueulard. — Le gaz est pris à ch basse.

Gaz pour l'analyse		$1^{lit},552$
Température		14°
Baromètre		$0^{m},735$
Gaz ramené à 0° et à $0^{m},760$		$1^{lit},431$
Acide carbonique		$^{gr}0,395$
Produits de la combustion.	Eau	0,075
	Acide carbonique	0,740
	Oxygène absorbé	0,336

Expérience N° 26.

Gaz pris au niveau du gueulard. — Le gaz est pris à ch basse.

Gaz pour l'analyse		$1^{lit},195$
Thermomètre		16°
Baromètre		$0^{m},732$
Gaz ramené à 0° et à $0^{m},760$		$1^{lit},087$
Acide carbonique		$^{gr}0,261$
Produits de la combustion.	Eau	0,057
	Acide carbonique	0,534
	Oxygène absorbé	0,241

J'ai fait dans cette expérience deux déterminations directes d'azote dont voici les données :

	(a)	(b)
Gaz écoulé V.	$0^{lit},188$	$0^{lit},337$
Eau recueillie v.	$0^{lit},110$	$0^{lit},200$
Différence de niveau.	$0^{m},240$	$0^{m},220$
Azote calculé pour 100 vol. du gaz.	56,76	56,90

La proportion d'azote contenue dans le gaz qui est sorti du gazomètre à mercure sera donnée par la formule

$$A = \frac{v(H - h)}{VH}$$

dans laquelle v représente le volume de l'eau écoulée,

V le volume du gaz sorti dans le même temps du gazomètre,

H la pression barométrique du lieu et de l'instant de l'expérience,

h la différence de niveau entre l'extrémité du tube d'écoulement et le niveau de l'eau dans la bouteille, réduite en millimètres de mercure et augmentée de la tension maximum de la vapeur d'eau à la température à laquelle on opère.

Expérience N° 27.

Gaz pris au niveau du gueulard. — Le gaz est pris au gueulard pendant qu'on charge.

On a remplacé $0^{m.c},10$ de charbon par $0^{m.c},11$ de bois.

Gaz pour l'analyse.		$1^{lit},590$
Baromètre		$0^{m},735$
Thermomètre		8°
Gaz ramené à 0° et à $0^{m},760$.		$1^{lit},494$
Acide carbonique.		$0^{gr},383$
Produits de la combustion.	Eau	0,082
	Acide carbonique. . .	0,715
	Oxygène absorbé. . .	0,333

a fait deux déterminations directes de l'azote :

	(a)	(b)
Gaz écoulé V.....	$0^{lit},337$	$0^{lit},435$
Eau recueillie v.....	$0^{lit},202,5$	$0^{lit},255$
Différence de niveau....	$0^{m},260$	$0^{m},310$
Azote pour 100..... .	57,8	56,2

Expérience N° 28.

Déterminations de la vapeur d'eau dans les gaz du gueul
— Lorsqu'on aspire le gaz dans le fourneau, le tube d'a
ration se couvre entièrement de gouttelettes d'eau et de
tières huileuses brunes; toutes ces matières ont été do
ensemble, en faisant passer le gaz à travers un tube à po
renfermant de l'acide sulfurique concentré. Le tube d
piration était légèrement chauffé sur toute sa longueur p
empêcher l'eau de s'y déposer.

Voici les données de quatre expériences.

	(a) Charge haute.	(b) Charge basse.	(c Charge basse.	(d) Char haut
Eau écoulée.....	1,560	1,590	1,610	1,
Différence de niveau.....	$0^{m},350$	$0^{m},390$	$0^{m},355$	0^{m}
Baromètre.....	0,735	0,735	0,734	
Thermomètre.....	13°	13°	14°	
Gaz ramené à 0° à l'état sec et à $0^{m},760$.....	lit. 1,365	lit. 1,371	lit. 1,400	
Eau recueillie par l'acide sulfurique.....	$0^{gr},303$	$0^{gr},181$	$0^{gr},283$	
Vapeur d'eau pour 100 vol. de gaz sec.....	27,5	16,3	24,9	

Je récapitule dans le tableau suivant les

toutes les analyses des gaz du gueulard. J'ai calculé tous ces résultats en admettant, comme pour les gaz du fourneau de Clerval, que l'hydrogène s'y trouvait à l'état de liberté, et cette supposition s'accorde bien avec toutes les déterminations de l'oxygène absorbé. L'azote a été dosé par différence, et l'on peut voir, en comparant le nombre ainsi obtenu avec celui trouvé directement, que les deux déterminations sont bien concordantes.

	(24)	(25)	(26)	(27)	MOYENNES.
Acide carbonique....	11,31	13,97	12,12	12,95	12,59
Oxyde de carbone...	25,86	26,12	24,81	24,17	25,24
Hydrogène.	6,46	6,49	6,48	6,77	6,55
Azote par différence.	56,37	53,42	56,59	56,11	55,62
Totaux.....	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Azote directement...	»	»	56,83	57,00	»

Les analyses (24), (26), (27) donnent des résultats bien comparables à ceux du haut fourneau de Clerval. On voit l'acide carbonique diminuer quand l'oxyde de carbone augmente, de manière que la somme des volumes des deux gaz reste constante. L'expérience (25) donne seule un excès assez notable d'acide carbonique et d'oxyde de carbone. Quant à la proportion de vapeur d'eau, elle paraît très-variable, et ses variations sont sans rapport avec la hauteur de la charge, résultat qui n'a rien d'étonnant, puisque l'expulsion de l'eau des minerais et des produits volatils de la distillation du bois ne se fait qu'à 3 ou 4 mètres de profondeur. Cette proportion d'eau est, en moyenne, près du double de celle que contiennent les gaz des fourneaux au charbon de bois. Il faut ajouter pourtant que l'eau est estimée un peu trop haut,

puisqu'on y a compris les vapeurs d'acide acétique et les différents produits huileux condensables par l'acide sulfurique concentré. Par le même motif, le résultat de l'analyse du gaz ne donne pas la valeur exacte des matières combustibles qu'il contient.

Il est remarquable que ces gaz permanents, provenant en partie de la distillation du bois, ne renferment que de l'hydrogène libre comme ceux des fourneaux alimentés avec du charbon seul ; il semblerait résulter de ce fait que le bois en se distillant, ne donne pas d'hydrogène carboné à l'état de gaz permanent, mais seulement de l'hydrogène chargé de vapeurs huileuses et de carbures d'hydrogène condensables par l'acide sulfurique concentré.

Expériences N°s 29 *et* 30.

Gaz pris à $3^m,33$ *de profondeur.* — Après avoir constaté que le bois et le minerai n'éprouvaient aucune altération jusqu'à 3 mètres de profondeur, j'ai pensé qu'il était inutile d'analyser les gaz dans les points intermédiaires, et j'ai fait descendre les tuyaux en fonte jusque dans la partie de cuve où la distillation commence à s'opérer. Voici les données des deux analyses :

		(29)	(30)
Gaz pour l'analyse		$1^{lit},600$	$1^{lit},610$
Thermomètre		8°	9°
Baromètre		$0^m,735$	$0^m,730$
Gaz ramené à 0° et à $0^m,760$		$1^{lit},503$	$1^{lit},495$
		gr	gr
Acide carbonique		0,510	0,349
Produits de la combustion.	Eau	0,100	0,084
	Acide carbonique	0,653	0,748
	Oxygène absorbé	0,324	»

On tire de ces nombres la composition suivante :

	(29)	(30)
Acide carbonique.....	17,14	11,79
Oxyde de carbone	21,97	25,27
Hydrogène.....	8,24	6,91
Azote (par diff.).....	52,65	56,03
	100,00	100,00

Deux déterminations d'azote faites pendant l'expérience 29) ont donné :

	(a)	(b)
Gaz écoulé V.....	0^{lit},308	0^{lit},388
Eau recueillie v.....	0^{lit},167	0^{lit},207
Différence de niveau.....	0^{m},225	0^{m},240
Azote sur 100 volumes....	52,4	51,6

Deux déterminations de vapeur d'eau contenue dans le az pris à cette même profondeur de 3^{m},33 ont donné :

	(a)	(b)
Eau écoulée.....	1^{lit},620	1^{lit},550
Température.....	16°	14°
Baromètre.....	0^{m},734	0^{m},730
Différence de niveau.....	0^{m},400	0^{m},390
Gaz ramené à l'état sec, à 0° et à 0^{m},760.....	1^{lit},401	1^{lit},337
Eau condensée	0^{gr},180	0^{gr},195
Vapeur d'eau correspondante à 100 volumes de gaz sec...	15,9	18,0

On s'aperçoit aisément en prenant le gaz qu'il renferme ncore beaucoup de produits de la distillation du bois. Il se épose du goudron dans les tubes d'aspiration.

Les résultats des expériences (29) et (30) diffèrent beaucoup entre eux. J'essayerai plus bas d'expliquer la cause de ette variation.

Expériences N°s 31 *et* 32.

Gaz pris à 4^{m},33 *de profondeur.* — Dans ces expériences t toutes celles qui suivent, il ne se dépose plus ni eau, ni

goudron dans les tubes d'aspiration, ce qui prouve que l bois est, à cette profondeur, complétement carbonisé. L gaz brûle à l'extrémité du tuyau en fonte avec une flamm bleue de trois à quatre pieds de hauteur.

		(31)	(32)
Gaz pour l'analyse		$1^{lit},570$	$1^{lit},629$
Thermomètre		$12^{o},5$	$12^{o},5$
Baromètre		$0^{m},720$	$0^{m},720$
Gaz ramené à 0° et à $0^{m},760$		$1^{lit},422$	$1^{lit},475$
Acide carbonique		gr 0,276	gr 0,272
Produits de la combustion.	Eau	0,068	0,062
	Acide carbonique.	0,813	0,840
	Oxygène absorbé.	0,354	»

On a fait plusieurs déterminations directes d'azote.

	(31)		(32)	
	(*a*)	(*b*)	(*a*)	(*b*)
Gaz écoulé V	lit 0,370	lit 0,420	lit 0,295	lit 0,46[illegible]
Eau recueillie *v*	0,210	0,241	0,172	0,26[illegible]
Différence de niveau	$0^{m},260$	$0^{m},240$	$0^{m},260$	$0^{m},24$[illegible]
Azote pour 100 volumes	54,4	55,1	55,8	56,4
Moyenne	54,75		56,2	

En calculant comme à l'ordinaire l'azote par différen on trouve pour la composition du gaz dans les deux ex riences (31) et (32) :

	(31)	(32)	Moyenne.
Acide carbonique	9,80	9,31	9,55
Oxyde de carbone	28,88	28,76	28,82
Hydrogène	5,92	5,21	5,56
Azote	55,40	56,72	56,07
	100,00	100,00	100,00

Une expérience faite pour doser l'eau m'a donné $0^{gr},026$ d'eau contenue dans $2^{lit},50$ de gaz supposé sec, ramené à 0 degré et à $0^{m},760$, ou 1,47 pour 100 volumes de gaz sec.

Expériences N°s 33 *et* 34.

Le gaz est pris à $5^{m},50$ *au-dessous du gueulard.* — Le courant de gaz sort par le tuyau de fonte avec une grande vitesse, en projetant tout à l'entour des grains de minerai et de petits morceaux de charbon; quand on l'allume, il brûle avec une flamme bleue de plusieurs pieds de hauteur.

		(33)	(34)
Gaz pour l'analyse		$1^{lit},600$	$1^{lit},570$
Baromètre		$0^{m},715$	$0^{m},717$
Thermomètre		11°,5	13°
Gaz ramené à 0° et à $0^{m},760$		$1^{lit},446$	$1^{lit},414$
Acide carbonique		$0^{gr},186$	$0^{gr},241$
Produits de la combustion.	Eau	0,053	0,053
	Acide carbonique	0,865	0,836

On a fait plusieurs déterminations d'azote.

	(33)		
	(*a*)	(*b*)	(*c*)
Gaz écoulé V.	$0^{lit},365$	$0^{lit},372$	$0^{lit},472$
Eau recueillie *v*	$0^{lit},221$	$0^{lit},220$	$0^{lit},282$
Différence de niveau	$0^{m},265$	$0^{m},245$	$0^{m},221$
Azote pour 100 volumes	58,0	57,5	57,4
Moyenne		57,6	

	(34)	
	(*a*)	(*b*)
Gaz écoulé V.	$0^{lit},350$	$0^{lit},740$
Eau recueillie *v*	$0^{lit},207,5$	$0^{lit},435$
Différence de niveau	$0^{m},285$	$0^{m},245$
Azote pour 100 volumes	56,62	56,10
Moyenne	56,36	

En dosant l'azote par différence, dans les deux expériences, on trouve :

	(33)	(34)	Moyenne.
Acide carbonique...	6,49	8,60	7,54
Oxyde de carbone ..	30,21	29,85	30,03
Hydrogène	4,54	4,64	4,59
Azote	58,76	56,91	57,84
	100,00	100,00	100,00

Expérience N° 35.

Gaz pris à $6^m,67$ *du gueulard.* — Le gaz sort par le tuy[illegible] de fonte avec un vitesse considérable, et produit, en s' [illegible] lumant, un jet de flamme d'une grande élévation; [illegible] fragments de charbon et des grains de minerai sont lan[illegible] au dehors par le courant de gaz.

Une seule expérience a donné :

Gaz pour l'analyse.....		$1^{lit},595$
Baromètre.....		$0^m,717$
Thermomètre		11°,5
Gaz ramené à 0° et à $0^m,760$.....		$1^{lit},442$
Acide carbonique		gr. 0,109
Produits de la combustion	Eau	0,047
	Acide carbonique....	0,979

J'ai déterminé directement l'azote :

	(a)	(b)	(c)
Gaz écoulé V.....	$0^{lit},328$	$0^{lit},378$	$0^{lit},502$
Eau recueillie v.....	$0^{lit},199$	$0^{lit},229$	$0^{lit},300$
Différence de niveau.....	$0^m,275$	$0^m,260$	$0^m,235$
Azote pour 100 volumes...	58,04	58,00	57,42
Moyenne.....		57,82	

En dosant l'azote par différence, on trouve :

Acide carbonique	3,81
Oxyde de carbone	34,28
Hydrogène	4,04
Azote	57,87
	100,00

Expériences N°s 36 *à* 38.

Gaz pris à $8^m,04$ *du gueulard.* — On a extrait le gaz du haut fourneau par un orifice percé dans la maçonnerie; le trou pratiqué est sur la face du contrevent, à $2^m,96$ du fond du creuset, et à $0^m,63$ au-dessus du grand ventre; la flamme qui sort par cet orifice est blanche, et possède l'odeur nauséabonde des gaz pris aux étalages du fourneau de Clerval.

Voici les résultats de trois expériences :

		(36)	(37)	(38)
Gaz pour l'analyse		$1^{lit},610$	$1^{lit},610$	$1^{lit},319$
Baromètre		$0^m,740$	$0^m,736$	$0^m,734$
Thermomètre		13°,5	14°	16°
Gaz ramené à 0° et à $0^m,760$		$1^{lit},494$	$1^{lit},483$	$1^{lit},203$
		gr	gr	gr
Acide carbonique		0,004	0,010	0,005
Produits de la combustion.	Eau	0,025	0,021	0,015
	Acide carbonique.	1,119	1,056	0,843

On tire de là :

	(36)	(37)	(38)	Moyenne.
Acide carbonique	0,13	0,33	0,18	0,21
Oxyde de carbone	37,82	35,96	35,39	36,39
Hydrogène	2,05	1,75	1,56	1,79
Azote	60,00	61,99	62,87	61,61
	100,00	100,00	100,00	100,00

Expérience N° 39.

Gaz pris au contrevent. — Le gaz est pris au contrevent, vis-à-vis de la tuyère et au même niveau.

Le fourneau a été percé au fleuret (1); on a introdui dans l'orifice, un tube en porcelaine d'un petit diamètre.

On a obtenu les nombres suivants :

Gaz pour l'analyse		$1^{lit},469$
Thermomètre		14°
Baromètre		$0^{m},736$
Gaz ramené à 0° et à $0^{m},760$		$1^{lit},353$
		gr
Acide carbonique		0,000
Produits de la combustion.	Eau	0,009
	Acide carbonique.	1,300

On tire de là :

Oxyde de carbone	48,52
Hydrogène	0,90
Azote	50,58
	100,00

Expérience N° 40.

Gaz pris à la rustine. — Le gaz est pris à la rustine, da la partie du creuset opposée à la poitrine du fourneau, à hauteur de la tuyère.

La prise de gaz a eu lieu de la même manière que da l'expérience précédente :

Gaz pour l'analyse		$1^{lit},457$
Baromètre		$0^{m},735$
Thermomètre		13°,5
Gaz ramené à 0° et à $0^{m},760$		$1^{lit},343$
		gr
Acide carbonique		0,000
Produits de la combustion	Eau	0,014
	Acide carbonique	1,252

(1) La tour du fourneau présente quatre embrasures, afin qu'on puis en cas d'engorgement du fourneau, placer des tuyères supplémentaires les faces de rustine et de contrevent. Cette disposition a facilité beauc le percement des trous pour l'extraction des gaz.

Ces données conduisent à la composition suivante :

Oxyde de carbone	47,08
Hydrogène	1,30
Azote	51,62
	100,00

Les trois expériences qui suivent (41), (42), (43), ont eu pour but de faire connaître la composition des gaz pris dans l'ouverture de la tuyère; la soustraction du gaz a été opérée de la manière indiquée à l'occasion des expériences analogues tentées au fourneau de Clerval. J'ai obtenu à Audincourt des résultats plus satisfaisants, après un certain nombre d'essais manqués par suite de la fusion ou de l'obstruction des tubes.

Expérience N° 41.

Gaz pris dans la tuyère. — Le tube qui amène le gaz hors du fourneau, plonge de $0^m,10$ dans l'ouverture de la tuyère; on donne tout le vent.

Gaz pour l'analyse		$1^{lit},225$
Baromètre		$0^m,740$
Thermomètre		16°
Gaz ramené à 0° et à $0^m,760$		$1^{lit},154$
		gr
Acide carbonique		0,077
Produits de la combustion.	Eau	0,000
	Acide carbonique.	0,000

On tire de là :

Acide carbonique	3,37
Oxygène et azote	96,63
	100,00

Expérience N° 42.

Gaz pris dans la tuyère. — Le double tube plonge de $0^m,15$ à $0^m,20$ dans la tuyère; on donne tout le vent.

Gaz pour l'analyse		$1^{lit},510$
Baromètre		$0^{m},735$
Thermomètre		14°
Gaz ramené à 0° et à $0^{m},760$		$1^{lit},387$
Acide carbonique		$0^{gr},174$
Produits de la combustion.	Eau	0,001
	Acide carbonique.	0,001

En négligeant les traces d'eau et d'acide carbonique produites dans la combustion, on trouve pour la composition du mélange gazeux :

Acide carbonique	6,34
Oxygène et azote	93,66
	100,00

Expérience N° 43.

Gaz pris entre la tuyère et la pierre de tuyère. — Dans cette expérience, on a introduit le double tuyau qui sert à l'extraction du gaz, dans le vide qui se trouve entre la tuyère et la pierre de tuyère ; on laisse environ un pouce d'intervalle entre la pierre et la tuyère en métal, et on remplit ce vide avec de la terre réfractaire; le tuyau a été introduit dans cet intervalle, et enfoncé de $0^{m},20$ environ dans le fourneau; on n'a pas donné tout le vent au moment de la prise du gaz.

Gaz pour l'analyse		$1^{lit},380$
Baromètre		$0^{m},735$
Thermomètre		13°
Gaz ramené à 0° et à $0^{m},760$		$1^{lit},274$
Acide carbonique		$0^{gr},066$
Produits de la combustion.	Eau	0,011
	Acide carbonique.	0,733

On tire de là :

Acide carbonique	2,61
Oxyde de carbone	29,05
Hydrogène	1,06
Azote	67,28
	100,00

Les trois expériences qui précèdent montrent d'une manière claire que l'oxygène de l'air se transforme d'abord, en arrivant dans le fourneau, en acide carbonique qui se change très-rapidement en oxyde de carbone ; les deux premières expériences se rapportent à de l'air qui renferme encore beaucoup d'oxygène et la dernière à un mélange d'acide carbonique et d'oxyde de carbone. Le volume d'oxygène, qui correspond dans l'air atmosphérique à 67,28 d'azote, est 17,67 ; celui que contient le gaz est $2,61 + \frac{29,05}{2} = 17,13$.

La différence entre les deux nombres est peu importante, et peut être attribuée à la difficulté de ce genre d'expériences. On peut aussi conclure de ce résultat, qu'il n'y a pas oxydation d'une proportion notable de fer, au passage des minerais devant la tuyère.

Conclusions.

Avant de comparer entre eux les résultats des analyses qui précèdent, il est convenable d'indiquer ici les bases de ces rapprochements. La masse d'air atmosphérique lancée dans la partie inférieure du fourneau, entraîne avec elle, en le traversant de bas en haut, la presque totalité du carbone, l'oxygène des minerais, l'acide carbonique du carbonate de chaux, enfin l'eau de combinaison des minerais. Parmi tous les éléments de l'air introduit, un seul se trouve en même quantité à sa sortie et à son entrée dans le fourneau, c'est l'azote, corps qui n'existe en quantité notable dans aucune des matières composant le lit de fusion. Si

donc on veut apprécier exactement de quelle manière varient les proportions respectives des autres éléments, ou plutôt si l'on veut découvrir quelles modifications éprouve une même tranche d'air atmosphérique en s'élevant depuis la tuyère jusqu'au gueulard, il faut rapporter la quantité de chacun des éléments contenus dans le gaz, à chaque hauteur, à une même quantité de l'élément invariable, l'azote; à la suite de chaque analyse, j'indiquerai donc :

1°. Le volume de vapeur de carbone correspondant à 100 volumes d'azote dans le gaz analysé;

2°. Le volume de l'oxygène qui excède, dans le gaz, celui correspondant à 100 volumes d'azote dans l'air atmosphérique;

3°. Le volume d'hydrogène correspondant au même volume d'azote.

Si le gaz, dans son mouvement d'ascension à travers le mélange de combustible et de minerai, avait la même composition sur toute la largeur d'une même tranche horizontale, il est évident que la composition du courant gazeux serait représentée par celle du gaz pris en un point quelconque de cette tranche, sur une surface très-faible, comparativement à son étendue totale. Mais il n'en est pas ainsi d'une manière absolue, et il est facile d'en montrer la cause: il me semble qu'on doit l'attribuer à la difficulté que ce courant éprouve à traverser le mélange de minerai et de combustible; plus ce mélange sera perméable, plus la composition de la tranche sera constante. Si les minerais sont en grains très-fins, si la majeure partie du charbon est en menu, la distribution du courant dans le fourneau sera loin d'être la même aux différents points d'une même section horizontale; il se formera dans la colonne de charbon et de minerais, des espèces de cheminées par où passera la majeure partie du gaz. Parmi les molécules d'air introduites au même instant dans le fourneau, toutes n'arriveront pas au gueulard en même temps, et cette circonstance seule

prouve qu'il n'y aura pas identité dans les modifications chimiques qu'elles subiront.

Cette irrégularité dans la distribution du courant de gaz est un fait qui s'observe dans tous les fourneaux, et qui est surtout saillant dans ceux où l'on emploie une forte proportion de bois en nature. Ce combustible se carbonise, comme on l'a vu, d'une manière assez rapide dans le fourneau, et produit un charbon friable, beaucoup moins cohérent que le charbon de meules. Au fourneau d'Audincourt, on voyait très-souvent la presque totalité du courant de gaz sortir, tantôt sur une des parois de la cuve, tantôt sur la paroi opposée. Dans les hauts fourneaux alimentés uniquement avec du charbon de bois, il est rare d'observer d'aussi grandes inégalités dans la distribution du courant, mais on voit constamment qu'il s'échappe du fourneau en suivant les parois de la cuve; la résistance au mouvement du fluide est moindre entre cette surface et le lit de fusion, que dans l'intérieur du lit de fusion lui-même.

C'est surtout lorsqu'on arrive dans une zone du fourneau où le courant éprouve de grandes modifications dans sa nature, que la cause d'irrégularité que je viens de signaler se fait sentir dans les résultats des analyses. On a pu remarquer une différence considérable entre les nombres fournis par deux analyses de gaz pris au fourneau d'Audincourt à la profondeur de $3^{m},33$, c'est-à-dire dans la région même où le bois se distille. Dans une des expériences, les produits de la distillation du bois se trouvent en plus grande proportion que dans l'autre. On peut observer le même fait dans les résultats des quatre analyses du gaz pris au gueulard; mais ici l'inégalité est beaucoup moins marquée, parce que l'on est plus éloigné du point où s'opère le mélange des gaz produits par la distillation du bois avec ceux provenant des parties inférieures du fourneau.

Les légères variations observées dans la composition des gaz pris au gueulard du fourneau de Clerval tiennent à une

cause analogue, et la manière dont ces variations s'opèrent le prouvent clairement. On voit, en effet, que l'hydrogène et l'azote restent constants; on n'observe de différences qu'entre les proportions respectives d'acide carbonique et d'oxyde de carbone, mais la somme des volumes des deux gaz reste invariable. Or, comme l'oxyde de carbone ne change pas de volume en se transformant en acide carbonique, on voit que les variations observées tiennent à ce que l'action réductive de l'oxyde de carbone sur l'oxyde de fer s'est exercée d'une manière plus ou moins complète dans la marche ascensionnelle du gaz sur la hauteur de la cuve. J'ai cherché à reconnaître si ces changements de composition correspondaient à quelques dérangements dans la marche du fourneau, à des chutes de minerai; mais je n'ai rien observé de semblable, ce qui tend à prouver que la composition moyenne du courant est la même, quoique les résultats des analyses présentent de légères variations.

On doit conclure de ce qui précède, que l'analyse donnera des résultats constants, à une même hauteur, et la composition moyenne de la tranche lorsque le temps pendant lequel on aspirera le gaz sera considérable. Ainsi les résultats des analyses que j'ai faites en 1839 au gueulard du fourneau de Clerval sont bien concordants (1), et j'attribue ce fait à la durée de la prise du gaz qui s'opérait pendant tout le temps de la combustion.

Je dois signaler pourtant une cause qui occasionnera des changements notables dans la composition moyenne d'une

(1) La moyenne des analyses faites en 1839 au gueulard du haut fourneau, dans son roulement normal, en faisant abstraction de l'eau et en admettant que l'hydrogène se trouve dans le gaz à l'état de liberté, est la suivante :

Acide carbonique.....	13,03
Oxyde de carbone.....	20,11
Hydrogène.....	7,52
Azote.....	59,34
	100,00

même tranche de gaz, à différents instants du roulement, et en supposant le lit de fusion toujours le même. C'est l'irrégularité dans l'introduction de l'air dans le fourneau. Une expérience faite à Clerval (8), au moment même où l'on perdait une partie du vent, prouve que dans ce cas les gaz renferment plus de carbone et d'oxygène que dans le roulement normal du fourneau. Lorsqu'on arrête tout à fait le vent, en bouchant la tuyère, comme cela arrive pendant la coulée, on observe que le dégagement du gaz continue au gueulard, et il est évident qu'il doit s'appauvrir de plus en plus en azote, puisqu'il ne provient plus que de la réaction du charbon ou de l'oxyde de carbone sur l'oxyde de fer, réaction qui continue tant que la température du mélange ne s'abaisse pas au-dessous d'un certain degré. Une diminution brusque dans la quantité d'air introduite doit donc produire un certain changement dans la composition du gaz sortant du fourneau.

Les deux tableaux suivants renferment les moyennes des analyses faites dans chacun des fourneaux, aux différentes hauteurs que j'ai indiquées. Ils permettent de saisir d'un seul coup d'œil comment varie la couche de gaz à mesure qu'elle s'élève dans le haut fourneau.

Les trois dernières lignes horizontales représentent, ainsi que je l'ai dit, pour faciliter la comparaison, les volumes de la vapeur de carbone, de l'oxygène en excès et de l'hydrogène correspondant à 100 volumes de gaz azote. J'appelle oxygène en excès celui qui excède, dans le gaz, l'oxygène correspondant à l'azote dans l'air atmosphérique. En supposant que l'oxygène se change d'abord en acide carbonique, puis en oxyde de carbone, on obtient les chiffres calculés inscrits dans les deux dernières colonnes de chaque tableau.

Il y a un peu plus d'hydrogène et d'azote dans ces premières expériences que dans la moyenne de celles décrites dans ce Mémoire. L'excès d'hydrogène provient sans doute de ce que le condenseur à potasse communiquait directement avec le tube à combustion. L'azote n'a varié que de 58 à 59,3.

	GAZ pris au gueulard	GAZ PRIS AU-DESSOUS DU GUEULARD.						GAZ PRIS A LA HAUTEUR DE LA TUYÈRE.			
		A 1m,33.	A 2m,67.	A 4m,00.	A 5m,33.	A 8m,67.	à 0m,44 au-dessus de la tuyère.	A la tympe.	A la tuyère 0m,10 de profondeur.	Calculé. (1)	Calculé. (2)
Acide carbonique	12,88	13,96	13,76	8,86	2,23	0,00	0,31	0,00	2,67	20,80	0,00
Oxyde de carbone	23,51	22,24	22,65	28,18	33,64	35,01	41,59	51,35	0,00	»	34,43
Hydrogène	5,82	6,00	5,44	3,82	3,59	1,92	1,42	1,25	0,00	»	»
Azote	57,79	57,80	58,15	59,14	60,54	63,07	56,68	47,40	79,20	79,20	65,57
Oxygène	»	»	»	»	»	»	»	»	18,13	»	»
Totaux	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Vapeur d'eau pour 100 volumes de gaz sec	11,9	13,4	2,6	0,9	0,4	0,0	0,0	0,0	»	»	»
pour 100 volumes d'azote. Vapeur de carbone	31,5	31,4	31,3	31,3	29,6	27,7	36,9	54,1	1,7	13,13	26,26
pour 100 volumes d'azote. Oxygène en excès	16,4	17,1	16,9	12,6	5,3	1,5	11,0	27,9	»	»	»
pour 100 volumes d'azote. Hydrogène	10,0	10,3	9,4	6,4	5,9	3,0	2,5	2,6	»	»	»

2°. *Haut fourneau d'Audincourt.*

	GAZ pris au gueulard	GAZ PRIS AU-DESSOUS DU GUEULARD.					HAUTEUR DE LA TUYÈRE.						
		A 3m,33.	A 4m,33.	A 5m,50.	A 6m,67.	A 8m,04.	Au contre-vent.	A la rustine.	A la tuyère 0m,10 de profondeur.	A la tuyère 0m,15 de profondeur.	A la tuyère sur le côté.	Calculé. (1)	Calculé. (2)
Acide carbonique	12,59	14,46	9,55	7,54	3,81	0,21	0,00	0,00	3,37	6,34	2,61	20,80	0,00
Oxyde de carbone	25,24	23,62	28,82	30,03	34,28	36,39	48,52	47,08	»	»	29,05	»	34,43
Hydrogène	6,55	7,53	5,56	4,59	4,04	1,79	0,90	1,30	»	»	1,06	»	»
Azote	55,62	54,39	56,07	57,84	57,87	61,61	50,58	51,62	79,20	79,20	67,28	79,20	65,57
Oxygène	»	»	»	»	»	»	»	»	17,43	14,46	»	»	»
Totaux	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Vapeur d'eau pour 100 volumes de gaz sec	22,7	17,0	1,5	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
Pour 100 volumes d'azote. Vapeur de carbone.	34,0	35,0	34,2	32,5	32,6	29,7	47,9	45,6	2,1	4,0	23,6	13,13	26,26
Pour 100 volumes d'azote. Oxygène en excès.	19,1	22,0	16,5	12,8	9,9	3,7	21,7	19,4	=	=	—0,7	=	=
Pour 100 volumes d'azote. Hydrogène	11,9	13,8	9,9	7,9	6,9	2,9	1,7	2,5	»	»	1,6	0	0

L'examen des tableaux précédents conduit aux conclusions suivantes, que je présenterai pour chacun des fourneaux successivement.

I. *Fourneau de Clerval.* — 1°. Dans le fourneau de Clerval, où l'on ne consomme que du charbon de bois, la proportion de vapeur d'eau contenue dans le gaz diminue rapidement de $1^m,33$ à $2^m,67$ de profondeur au-dessous du gueulard; les autres principes constituants du mélange gazeux ne varient que dans des limites peu étendues.

2°. A mesure qu'on descend dans le fourneau, de $2^m,67$ jusqu'à $5^m,67$, on voit la proportion d'oxyde de carbone augmenter, en même temps que l'acide carbonique et l'hydrogène diminuent. A la profondeur de $5^m,67$, l'acide carbonique a complétement disparu, et la quantité d'oxygène combinée dans le gaz en sus de celle qui correspond à l'azote, s'est abaissée de 16,4 à 1,5, c'est-à-dire au 0,1 de ce qu'elle était au gueulard. La proportion de vapeur de carbone, rapportée à 100 volumes d'azote, reste constante jusqu'à $4^m,00$ de profondeur A partir de ce point jusqu'à $5^m,67$, elle varie de 31,3 à 27,7. La différence 3,6 représente les 0,11 de la quantité totale de charbon.

3°. Les résultats des analyses du gaz pris dans l'ouvrage et sous la tympe du fourneau de Clerval, comme ceux des analyses des gaz du contrevent et de la rustine, à Audincourt, ne peuvent pas représenter la composition moyenne de la tranche gazeuse, puisqu'il faudrait admettre que le gaz abandonne la moitié du carbone et la presque totalité de l'excès d'oxygène qu'il contenait pour arriver au sommet des étalages, conclusion qui serait absurde. Il est, je crois, très-facile de donner une explication satisfaisante de ces résultats. Les matières qui recouvrent le bain de fonte dans le creuset, celles qui sont adhérentes aux parois de l'ouvrage jusqu'à une certaine hauteur au-dessus de la tuyère, sont des silicates renfermant encore une certaine quantité d'oxyde de fer; le mélange de ces silicates à l'état pâteux avec

des fragments de charbon, dégage constamment de l'oxyde de carbone. Un trou percé dans la paroi amènera donc au dehors, avec une certaine quantité du gaz qui circule au milieu de l'appareil, tout l'oxyde de carbone produit dans le voisinage de cet orifice. Il est évident que lorsque les matières arrivent dans le fourneau à l'état pâteux, il ne peut plus y avoir d'homogénéité dans la composition du courant à cette hauteur.

II. *Fourneau d'Audincourt.* — Les résultats obtenus dans le haut fourneau d'Audincourt sont bien d'accord avec les précédents. On voit que l'eau se dégage entièrement avec les produits de la distillation du bois depuis $3^m,00$ jusqu'à $4^m,33$ de profondeur. La proportion en est beaucoup plus considérable qu'à Clerval, ce qui tient à l'emploi du bois en nature. L'excès d'oxygène contenu dans le gaz en sus de celui qui correspond à l'azote, diminue, du gueulard à $8^m,04$ de profondeur, depuis 19,1 jusqu'à 3,8. L'acide carbonique diminue à mesure qu'on descend, et on n'en trouve plus que des traces à $8^m,00$ du gueulard. La proportion d'hydrogène diminue aussi rapidement jusqu'à cette profondeur, pour rester ensuite à peu près constante jusque dans le bas du fourneau.

Cette portion d'hydrogène qui persiste sur toute la hauteur de l'appareil, provient sans doute de la décomposition de la vapeur d'eau renfermée dans l'air atmosphérique.

Depuis la naissance des étalages jusqu'à une petite distance de la tuyère, le courant de gaz est essentiellement formé d'oxyde de carbone et d'azote. L'acide carbonique reparaît vis-à-vis de la tuyère.

J'ai indiqué dans les deux dernières colonnes de chaque tableau la composition que doit avoir le courant de gaz, en admettant que l'oxygène se change d'abord en acide carbonique, puis en oxyde de carbone; les résultats que j'ai obtenus me semblent bien suffisants pour justifier ce deux hypothèses.

Application des résultats précédents à la théorie des hauts fourneaux.

L'emploi du bois en nature, dans le fourneau d'Audincourt, s'oppose à ce qu'on puisse apprécier d'une manière tout à fait nette les transformations qu'éprouve le courant gazeux en s'élevant du bas jusqu'en haut du fourneau. Les considérations qu'il me reste à présenter s'appliquent donc plus spécialement au fourneau de Clerval, et je prendrai les résultats des analyses faites dans cette usine pour me servir de point de départ. On a pu voir, du reste, qu'à partir du point où le bois est carbonisé, les résultats obtenus dans les analyses conduisent à des conclusions identiques dans les deux fourneaux.

A une petite distance de la tuyère, l'oxygène de l'air est complétement tranformé en acide carbonique. Un peu plus loin, la transformation de l'acide carbonique en oxyde de carbone s'effectue par la combustion d'une quantité de charbon égale à celle contenue dans l'acide carbonique. A partir de ce point, situé, comme on l'a vu, à une faible distance de la tuyère, le courant gazeux n'éprouve pas de changement notable dans sa composition jusqu'au sommet des étalages, et elle est caractérisée par l'absence complète d'acide carbonique. La proportion d'oxyde de carbone a légèrement augmenté, et ce résultat s'explique par la réduction des dernières parties d'oxyde de fer, probablement à l'état de silicate. Nous avons vu que cette réduction continuait à s'opérer sur les parois de l'ouvrage, et même dans le creuset. Mais la quantité de carbone ne s'élève à Clerval que de 26,26 à 27,7 pour 100 d'azote, et à Audincourt de 26,26 à 29,7. La différence est plus grande à Audincourt qu'à Clerval, et j'attribue ce fait à l'emploi des scories de forges en proportion assez considérable dans le lit de fusion du premier fourneau. J'ai constaté dans un précédent tra-

vail (p. 210) que ces scories descendent jusqu'au ventre du fourneau sans éprouver de réduction.

Depuis le ventre du fourneau jusqu'au gueulard, on voit la proportion de l'acide carbonique augmenter graduellement jusque vers le milieu de la hauteur de la cuve, où elle devient constante. En même temps la proportion d'oxyde de carbone diminue, tandis que celle de l'hydrogène augmente. Si l'oxyde de carbone se changeait en acide carbonique par la réduction de l'oxyde de fer, sans qu'il s'opérât d'autre réaction, il est évident que le total des volumes des deux gaz, ou, si l'on veut, le volume de vapeur de carbone rapporté à 100 volumes d'azote, devrait rester absolument constant. Le volume de vapeur de carbone s'élève de 27,7 à 31,3 sur 1^m,67 de hauteur, depuis les étalages jusqu'à 4^m,00 du gueulard, et reste depuis ce point tout à fait constant. L'oxygène enlevé par le courant augmente dans la proportion de 1,5 à 17, depuis les étalages jusqu'à 2^m,67 du gueulard, où il devient constant. Dans la partie du fourneau comprise entre 2^m,67 et 4^m,00 à partir du gueulard, l'oxygène varie de 12,7 à 17, tandis que le carbone reste invariable. La seule action chimique produite dans ce dernier intervalle, est donc la transformation de l'oxyde de carbone en acide carbonique.

Il est assurément fort remarquable de voir la proportion d'hydrogène marcher en sens inverse de celle de l'oxyde de carbone, et augmenter constamment depuis les étalages jusqu'au gueulard. Il semble que ce gaz n'ait aucune influence sur la réduction de l'oxyde de fer, et que tout l'oxygène se porte de préférence sur l'oxyde de carbone. Nous pouvons vérifier cette conjecture.

Les matières volatiles que dégage le charbon chauffé en vase clos, l'acide carbonique abandonné par la castine, et qui se dégage, comme je l'ai constaté directement, un peu au-dessus des étalages, ont, sur la composition du gaz, une influence qu'on peut apprécier très-approximativement.

Nous avons admis que les matières volatiles provenant de la calcination du charbon de meules, se représentaient par un mélange d'oxyde de carbone et d'hydrogène.

Or, d'après la composition du lit de fusion du fourneau de Clerval :

1 de minerai correspond à 0,388 de charbon ou à 0,318 de carbone.

1 de minerai et de castine renferme	0,120	oxygène combiné au fer.
	0,067	oxygène combiné au carbone.
	0,025	carbone à l'état d'acide carbonique.

Le carbone contenu dans la castine et celui dégagé du charbon par calcination forment, d'après un calcul facile à faire, les 0,115 du carbone total.

L'oxygène combiné au carbone dans le carbonate de chaux et celui dégagé par le charbon à l'état d'oxyde de carbone forment les 0,42 de l'oxygène total, déduction faite de l'oxygène atmosphérique.

En partant de ces données, on trouve :

1°. Que sur 31,3 de carbone total entraîné par le gaz, il ne doit plus rester, après défalcation du carbone contenu dans la castine et dans les matières volatiles du charbon, que 27,7;

2°. Que la proportion d'hydrogène produite dans la distillation du charbon est, en poids, les 0,031 de celui du carbone, ou pour 31,8 volumes de vapeur de carbone, 5,8 volumes d'hydrogène. En ajoutant à ce nombre l'hydrogène provenant de la partie inférieure du fourneau, où il est produit par la décomposition de la vapeur d'eau contenue dans l'air injecté, on trouve 8,8, nombre un peu inférieur à celui qui représente la totalité de l'hydrogène contenu dans les gaz du gueulard (10).

On peut donc tirer de ce qui précède ces deux conclusions importantes :

1°. Sur toute la hauteur de la cuve du fourneau, le char-

bonne perd que les matières volatiles qui s'en dégageraient par la calcination en vase clos : il ne s'opère aucune action chimique entre le minerai et le charbon d'une part, et, de l'autre, entre le charbon et l'acide carbonique résultant de la réduction du minerai et de la calcination de la castine.

2°. L'hydrogène que donne le charbon de bois à la distillation n'exerce dans le fourneau aucune action sur l'oxyde de fer, et se retrouve tout entier dans le gaz du gueulard avec celui qui provient de la décomposition de la vapeur d'eau contenue dans l'air injecté par la tuyère.

M. W. Henry (1) avait déjà prouvé qu'en mêlant 1 volume d'oxyde de carbone, 1 volume d'hydrogène et $\frac{1}{2}$ volume d'oxygène en présence de l'éponge de platine, l'oxygène se portait de préférence sur l'oxyde de carbone, dont les 0,8 se trouvaient transformés en acide carbonique, tandis que 0,2 seulement de l'hydrogène entraient en combinaison. En déterminant, au contraire, la combinaison par la chaleur, les 0,6 de l'oxygène se combinaient à l'hydrogène et le reste avec l'oxyde de carbone. Dans le haut fourneau, l'oxyde de carbone est en grand excès par rapport à l'hydrogène, surtout dans la partie inférieure de la cuve, et son action exclusive sur l'oxygène paraît dépendre de sa masse, beaucoup plus considérable que celle de l'autre gaz combustible.

La quantité de carbone consommée depuis les étalages jusqu'à la tuyère est la différence entre 27,7 et 26,26. Elle est environ les 0,06 du carbone total.

La proportion d'oxygène qui reste dans le lit de fusion aux étalages peut être facilement déterminée. Si l'on retranche de l'oxygène total les 0,42 qui représentent l'oxygène fourni par la castine et le charbon employé, on trouve 9,9 qui représente celui abandonné par les minerais. Il en reste encore, comme on l'a vu, 1,5 au grand ventre. La réduction au sommet des étalages est donc complète, aux 0,15 près,

(1) *Philos. Magaz.*, mai 1835 et novembre 1836.

et s'achève dans l'espace occupé par les charges jusqu'à la tuyère. Cette période de la réduction diffère de l'autre en ce qu'elle a lieu avec consommation de charbon.

La cuve d'un haut fourneau au charbon de bois est donc à sa partie supérieure un appareil où la calcination du minerai s'opère. La partie inférieure de la cuve sert à la réduction de l'oxyde de fer, et l'effectue à plus des 0,83. Dans la région inférieure du fourneau, la carburation a lieu en même temps que la fin de la réduction. Enfin, et à une petite distance au-dessus de la tuyère, à $0^m,20$ ou $0^m,30$ au plus, se trouve le *point de fusion.*

L'acide carbonique, qui résulte, comme nous l'avons vu, de l'action de l'air sur le charbon devant la tuyère, se change très-rapidement en oxyde de carbone. Les limites de la zone où cette transformation s'est opérée me paraissent devoir être les mêmes que celles de la zone de fusion. Il suffit, pour le prouver, de s'appuyer sur les résultats des recherches faites par Dulong sur la combustion du carbone et de l'oxyde de carbone (1). On en déduit très-simplement cette conséquence déjà présentée plus haut (p. 156), que l'acide carbonique se refroidit considérablement en se transformant en oxyde de carbone.

En effet, d'après Dulong, 1 litre de vapeur de carbone donne en brûlant 2 litres d'acide carbonique, et dégage 7,858 unités de chaleur.

Or 2 litres d'oxyde de carbone donnent aussi 2 litres d'acide carbonique, et produisent 6,260 unités de chaleur.

En se transformant en oxyde de carbone, 1 litre de vapeur de carbone n'a donc produit que 1,598 unités ou 0,2 environ de la chaleur totale.

Si la combustion du charbon a lieu dans l'oxygène, on déduira des nombres précédents les températures de combustion dans les deux cas de la manière suivante :

---

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* 1838, 2e semestre, p. 874.

2 litres d'acide carbonique pèsent...	3,96 gr
2 litres d'oxyde de carbone pèsent...	2,58

Les chaleurs spécifiques des deux gaz étant 0,221 pour l'acide carbonique, et 0,288 pour l'oxyde de carbone, on trouve que les températures de combustion dans l'oxygène sont

$$\frac{7,858}{3,96 \times 0,221} = 8,980^\circ \text{ s'il se forme de l'acide carbonique,}$$

$$\frac{1,598}{2,58 \times 0,288} = 2,192^\circ \text{ s'il se forme de l'oxyde de carbone.}$$

Si la combustion a lieu dans l'air atmosphérique, on déterminera les températures produites ainsi qu'il suit :

1°. Pour la formation de l'acide carbonique,

1 litre vapeur carbone,	pesant	1,077 gr	consomme
2 litres oxygène.....	pèsant	12,490	
7^{lit},615 azote.....			
Total.....		13,567	

Les produits de la combustion sont :

		Quantité de chaleur que prend le gaz en s'échauffant de 1°.
	gr	
Acide carbonique.....	3,950	0,873
Azote.....	9,617	2,645
	13,567	3,518

La température de combustion sera $\frac{7,858}{3,518} = 2,232^\circ$.

2°. Si, au contraire, il ne se forme que de l'oxyde de carbone avec la même quantité d'air, on aura

2 litres vapeur de carbone =	2,154 gr
9^{lit},615 air.....	12,490
	14,644

qui produiront :

	gr	Quantité de chaleur que prend le gaz en s'échauffant de 1°.
4 litres oxyde de carbone pesant.	5,027	1,448
7^{lit},615 azote pesant.....	9,617	2,645
	14,644	4,093

La température de combustion sera $\frac{3,196}{4,093} = 780°$.

D'après ces calculs, on trouve que la température s'abaissera de 2,232 degrés à 780 degrés (1), par la transformation de l'acide carbonique en oxyde de carbone dans le courant d'air qui traverse le fourneau. La combustion de la moitié du charbon vis-à-vis de la tuyère produit une température extrêmement élevée, qui suffit pour liquéfier le fer forgé et la porcelaine : la combustion de l'autre moitié détermine une absorption considérable de chaleur latente et un abaissement correspondant dans la température du foyer.

Cette concentration de la chaleur dans la partie inférieure de l'appareil me paraît caractériser les fourneaux à cuve, et les distinguer des foyers où le combustible n'est pas mélangé avec la matière à traiter comme dans les fours à réverbère. Ici, il est nécessaire d'avoir une température très-élevée et à peu près uniforme sur une grande surface. Dans les fourneaux à tuyères, au contraire, la zone où s'opère la fusion est fort peu étendue, et la température

(1) Ces nombres sont un peu faibles, puisqu'on suppose le charbon à la température de 0°. Il faut admettre dans les deux cas, pour être plus près de la vérité, que le charbon est porté à la température due à la production de l'oxyde de carbone.

La chaleur spécifique du charbon de bois est 0,24.

Les 2^{gr},154 de charbon prennent 0,517 unités de chaleur en s'échauffant de 1°.

La température de combustion sera donc donnée par l'équation

$$0,517x + 3196 = 4,093x \; ; \quad \text{d'où} \quad x = 893°.$$

La température de combustion due à la formation de l'acide carbonique sera $\frac{7,858 + 229}{3,516} = 2,298°$.

s'abaisse d'une manière brusque à une petite distance de l'endroit où le maximum a lieu.

Dans les hauts fourneaux au coke, on verra plus loin (p. 336 et suivantes), d'après les résultats des analyses des gaz provenant de ces fourneaux et des cubilots, que la partie du fourneau où la transformation complète de l'oxygène atmosphérique en oxyde de carbone a lieu, est plus éloignée de la tuyère que dans les fourneaux au charbon de bois. Les ouvrages de ces derniers sont aussi en général moins élevés que ceux des fourneaux au coke.

Les dimensions que l'on donne à l'ouvrage soit en largeur, soit en hauteur, et qui sont déterminées par la considération de la force du vent et de la nature des charbons et des minerais, sont en rapport avec les limites de la zone de fusion qui varient évidemment avec les mêmes circonstances.

Il m'a paru d'un assez grand intérêt de déterminer la température du haut fourneau à divers points de sa hauteur. J'ai réuni (page 351) les résultats de quelques recherches suivies. Je vais ici chercher à apprécier les principales circonstances qui tendent à abaisser ou à élever la température du courant. Le poids du minerai et du charbon introduits dans le fourneau ne forme que la moitié du poids des gaz qui se dégagent. La chaleur spécifique de toutes les matières qui entrent dans le lit de fusion est aussi de beaucoup inférieure à celle du gaz. On ne peut donc pas expliquer la perte de chaleur qu'éprouve le courant de gaz par l'échauffement successif des charges.

La première, et la plus importante cause de refroidissement du gaz, c'est, comme je l'ai indiqué, la formation de l'oxyde de carbone. L'expulsion de l'acide carbonique de la castine et celle de l'eau des minerais qui s'opèrent à des hauteurs différentes dans la cuve, produisent aussi une absorption considérable de chaleur latente, qu'il n'est pas possible d'apprécier en ce moment, du moins quant à l'acide carbonique.

Les recherches de Dulong vont nous permettre d'examiner quel est l'effet calorifique produit dans la réduction de l'oxyde de fer à l'état métallique.

Dulong a trouvé que dans la combustion du fer par l'oxygène, 1 litre de ce gaz produisait 6,216 unités de chaleur. L'oxyde de fer, en perdant son oxygène, doit absorber toute la chaleur produite dans la combinaison. Il y aura donc d'une part 6,216 unités de chaleur rendues latentes.

Si nous admettons que la réduction s'opère par la transformation de l'oxyde de carbone en acide carbonique, comme cela a lieu sur toute la hauteur de la cuve du fourneau, nous trouvons qu'en se combinant avec 1 litre d'oxygène, 2 litres d'oxyde de carbone doivent produire 6,260 unités de chaleur, c'est-à-dire un nombre sensiblement égal au premier. On peut donc admettre que la transformation de l'oxyde de fer en fer métallique au moyen de l'oxyde de carbone, a lieu sans effet calorifique sensible.

Il en sera tout autrement si la réduction s'opère par le charbon avec formation d'oxyde de carbone, comme cela a lieu dans les parties inférieures du haut fourneau. 1 litre d'oxygène ne dégage, pour transformer 1 litre vapeur de carbone en 2 litres d'oxyde de carbone, que 1,598 unités de chaleur. D'où l'on conclut qu'il y aura absorption de 4,618 unités de chaleur rendues latentes par la réduction de l'oxyde de fer en fer métallique. En outre, il se brûle en même temps 1 litre de vapeur de carbone. Il y a donc dans ce cas double consommation de charbon : 1° pour restituer au fourneau les 4,618 unités de chaleur rendues latentes ; 2° par la formation de 2 litres d'oxyde de carbone. En tenant compte de ces deux causes, on trouve que la consommation de combustible dépasserait de 95 pour 100 celle qui correspond au roulement actuel du fourneau de Clerval (1).

---

(1) Si la combustion du fer dans l'oxygène donne de l'oxyde magnétique, on trouve qu'un litre d'oxygène correspond à 3gr,65 de fer. 1gr de fer

Parmi les minerais de fer, les uns, comme les hydroxydes en grains ou associés au carbonate de chaux, se réduisent à peu près complétement par l'oxyde de carbone; les autres, comme les peroxydes anhydres et les silicates de fer, exigent une température plus élevée, et leur réduction produit beaucoup d'oxyde de carbone. Ces derniers exigeront donc pour leur traitement une proportion plus considérable de charbon. Les considérations qui précèdent permettent aussi d'apprécier l'influence des accidents qu'on désigne dans les fourneaux sous le nom de chutes de mines. Les minerais en grains, imparfaitement réduits, qui arrivent dans la partie inférieure du fourneau s'y transforment rapidement en silicates de fer, dont la réduction ultérieure doit contribuer à refroidir l'appareil. N'est-il pas permis d'en conclure que ces variations brusques, sans motif apparent, qui dérangent si souvent la marche des hauts fourneaux sont dus à la même cause, c'est-à-dire à ce que la réduction de l'oxyde de fer s'opère tantôt par la transformation de l'oxyde de carbone en acide carbonique, tantôt avec production d'oxyde de carbone.

Je dois faire remarquer aussi que l'on peut déduire des résultats généraux qui précèdent, une explication rationnelle des formes du profil intérieur du haut fourneau et des variations qu'on fait subir à ses dimensions d'après la nature des minerais et du charbon qu'on y emploie. Je me bornerai à cet égard à quelques indications.

Le vide intérieur d'un haut fourneau se compose, comme

---

réduit a donc rendu latentes $\frac{4618}{3,65} = 1,265$ calories qui correspondent à la chaleur de combustion de $0^{lit},781$ de carbone brûlé à l'état d'oxyde. D'un autre côté, pour 1^{gr} de fer réduit, il y a $\frac{1}{3,65} = 0^{lit},274$ de carbone transformé en oxyde. La perte de combustible pour 1^{gr} de fe_r réduit serait donc $1^{lit},055$ vapeur carbone pesant $1^{gr},14$. Or 1^{gr} de fer correspond, d'après le roulement du fourneau de Clerval, à $1^{gr},197$ de carbone, dont $1^{gr},14$ forment les 0,95.

on sait, de deux troncs de cône accolés par leur grande base. La petite base du tronc de cône renversé qui forme les étalages se raccorde avec une partie prismatique ou légèrement évasée à sa partie supérieure, qui descend sur la tuyère et forme ce qu'on appelle l'ouvrage du fourneau.

La manière dont se distribue le courant de gaz dans chacune des trois parties distinctes dont se compose un haut fourneau est facile à déduire de la considération de leurs formes.

Dans l'ouvrage, le courant d'air lancé horizontalement par la tuyère doit pénétrer jusqu'au contrevent, et s'élever ensuite verticalement en occupant toute la largeur de l'appareil. On a des ouvrages rétrécis et élevés pour des minerais réfractaires et lorsqu'on veut obtenir des fontes très-grises. Les ouvrages larges et peu élevés correspondent à la fabrication des fontes de forge et à l'emploi de minerais facilement fusibles. Les fontes deviennent blanches quand l'ouvrage est trop élargi, parce que tous les minerais ne participent pas également à la haute température due à la formation de l'acide carbonique devant la tuyère.

Le haut fourneau s'élargit très-rapidement du sommet de l'ouvrage jusqu'au grand ventre. Cette disposition, dont l'expérience a fait reconnaître la convenance, prouve que l'action du courant de gaz sur le minerai n'est pas essentielle pour produire les modifications chimiques qu'il subit dans cette partie du fourneau. Il est évident que le courant, en sortant de l'ouvrage, tend à s'élever à peu près verticalement, et ne se répartit pas d'une manière uniforme à travers la masse des matières contenues dans les étalages. C'est dans cette région que s'opère la carburation du fer.

La forme du vide intérieur de la cuve prouve, au contraire, que le contact des gaz avec les minerais est indispensable à leur préparation dans cette partie de l'appareil. On peut remarquer, et j'ai déjà eu occasion de signaler ce

fait, que la majeure partie du courant s'échappe du fourneau en suivant les parois de la cuve. Pour les atteindre, après avoir traversé à peu près verticalement les étalages, il faut que le courant diverge du centre et se répartisse d'une manière sensiblement uniforme à travers le lit de fusion.

On cherche à obtenir dans le haut fourneau, d'une quantité donnée de minerai, la plus grande proportion de fonte, en consommant le moins possible de charbon. Cette quantité de charbon consommée se décompose en deux parties : l'une, qui se brûle devant la tuyère, est destinée à produire une température suffisamment élevée pour la fusion des matières, et son poids, comparé à celui des matières à fondre, ne dépend que de leur degré de fusibilité; l'autre est employée à réduire les minerais, et l'on doit chercher à la rendre aussi faible que possible, en utilisant pour cette réduction l'oxyde de carbone produit, dans la partie inférieure du fourneau, par l'action de l'air sur le charbon. Or nous avons vu que cette action, sans consommation de combustible, s'opérait sur toute la hauteur de la cuve. C'est seulement quand le minerai arrive imparfaitement réduit dans les étalages que sa préparation s'achève avec dépense de charbon. L'oxyde de fer se combine avec la silice sous l'influence d'une température élevée. La majeure partie des matières est soustraite à l'action du courant qui s'élève verticalement au milieu des étalages, et leur réduction ultérieure ne peut s'opérer que par le contact du charbon.

Il est facile de s'assurer que les différences qu'on observe entre les profils intérieurs des hauts fourneaux peuvent s'expliquer d'après les considérations précédentes.

Avec des minerais compactes, difficiles à reduire par cémentation, réfractaires (1), l'expérience prouve qu'il faut des étalages peu inclinés à l'horizon, et que le ventre doit

(1) *Traité de la Métallurgie du fer*, par M. Karsten, t. II, p. 170, 171.

être très-rapproché de la tuyère. On cherche évidemment à diminuer, autant que possible, le volume de la partie du fourneau où les minerais seront en partie soustraits à l'action du courant.

On sait que les petits fourneaux consomment généralement plus de combustible que les grands. La chaleur sensible des gaz au gueulard est à peu près la même dans les deux cas, et la différence, si elle existe, ne peut pas expliquer l'augmentation dans la consommation du charbon. On doit l'attribuer à ce que les minerais arrivent rapidement dans une partie échauffée du fourneau sans être complétement réduits. L'oxyde de fer se combine avec la silice, et la réduction ultérieure s'opère avec consommation de charbon et absorption de chaleur latente. Aussi est-on dans l'usage de donner à ces petits fourneaux des étalages d'une pente très-douce.

Lorsqu'on doit traiter des hydroxydes en grains à gangue argileuse ou calcaire, d'une réduction facile, on est au contraire dans l'usage de donner aux étalages une plus grande hauteur et une plus forte inclinaison que dans le cas précédent. La réduction s'opère complétement à une température peu élevée comparativement, et dans un temps moins long. On peut donc éloigner davantage de la tuyère le ventre du fourneau.

Il resterait à expliquer maintenant ce fait remarquable : pourquoi l'acide carbonique qui se forme sur toute la hauteur de la cuve par la réduction du minerai, ne se transforme-t-il plus en oxyde de carbone? Cette réaction entre l'acide carbonique et le charbon ne s'opère peut-être qu'à une température supérieure à celle qui a lieu dans la cuve du fourneau.

Je terminerai ce chapitre par quelques considérations sur les effets de la vapeur d'eau et du vent chaud employés comme agents de combustion.

Effets de l'air chaud. — On peut, je crois, rendre compte

des effets économiques de l'air chaud en les attribuant spécialement à la quantité de chaleur sensible qu'il contient. En effet, l'injection de l'air a pour effet de produire dans le bas de l'appareil un certain degré de température. Avec de l'air à 0 degré et du charbon seulement on produirait une température de 2,231 degrés. Le mélange des minerais diminue nécessairement cette température limite, et l'abaisse d'autant plus que ces matières se trouvent en proportion plus considérable par rapport au charbon. On peut revenir au degré de chaleur nécessaire pour la fusion en suppléant au manque de combustible par la chaleur sensible que possède l'air introduit.

Supposons que l'air soit chauffé à 300 degrés : pour produire 2 litres d'acide carbonique avec 1 litre de vapeur de carbone, il faut 12^{gr},490 d'air. La quantité de chaleur nécessaire pour porter cette quantité d'air à la température de 300 degrés sera $12,49 \times 0,267 \times 300 = 1,000$ unités de chaleur qui représentent les 0,125 de celle produite par la combustion du charbon transformé en acide carbonique devant la tuyère. On pourra donc, en supprimant les 0,125 de la quantité de charbon consommé dans cette réaction avec de l'air à 0 degré, et en chauffant l'air à 300 degrés, produire dans le bas du fourneau une température aussi élevée que dans le premier cas.

En second lieu, comme la quantité de charbon nécessaire pour faire de l'oxyde de carbone est égale à celle contenue dans l'acide carbonique, on voit qu'en économisant les 0,125 de celle-ci, on arrivera à réaliser une économie des 0,125 sur la totalité du combustible employé.

En réfléchissant aux circonstances de la combustion du charbon, on se convaincra que la quantité de chaleur introduite par l'air est utilisée seulement dans le bas du fourneau. Si les proportions respectives de charbon et de minerai sont telles à l'air froid et à l'air chaud, que les températures finales du mélange d'acide carbonique et d'azote produites

dans la première période de la réaction soient les mêmes dans les deux cas, elles seront encore, à peu de chose près, égales après le refroidissement dû à la formation de l'oxyde de carbone. Mais, à partir de ce moment, le refroidissement du courant s'opérera dans les deux cas d'une manière différente. En effet, la quantité d'air introduite est proportionnelle au charbon brûlé; dans le roulement à l'air chaud, le poids du gaz qui traverse le fourneau est donc moindre par rapport au poids des minerais que dans le roulement à l'air froid. Le courant de gaz est le seul agent calorifique dans l'intérieur de l'appareil, et si nous admettons que sa température, après la formation de l'oxyde de carbone, soit la même qu'à l'air froid, il est évident qu'il y aura dans toute la partie supérieure du fourneau moins de chaleur à l'air chaud qu'à l'air froid. Si l'on veut augmenter la proportion des gaz qui traversent le fourneau, afin de réchauffer les parties supérieures, il faut augmenter la proportion de charbon, et on obtient alors dans le bas du fourneau une température beaucoup plus élevée qu'en roulant au vent froid. Il est certain aussi, comme l'a fait remarquer M. Berthier, que l'échauffement de l'air produit une combustion plus rapide du charbon. La zone où l'acide carbonique se forme a moins d'étendue qu'au vent froid, et cette circonstance, jointe à une température de combustion plus élevée, doit déterminer des modifications importantes dans la nature des phénomènes chimiques produits devant la tuyère, et particulièrement dans la composition des fontes.

Si l'explication que je viens de présenter est exacte, il doit résulter de l'emploi de l'air chauffé à 300 degrés une économie des 0,12 environ sur le charbon consommé. Ce est effectivement le nombre qui représente la différence entre les roulements à l'air froid et ceux à l'air chaud dans les usines de la compagnie d'Audincourt. Dans tous ces fourneaux où l'air chaud est introduit depuis plus

sieurs années, l'économie de combustible a varié entre 8 et 12 pour 100. Dans d'autres usines, on a obtenu, par l'emploi de l'air chaud, une économie de combustible supérieure à celle que je viens d'indiquer. Cet effet doit être attribué, ce me semble, à ce que le changement apporté par l'air chaud dans la distribution de la chaleur dans le haut fourneau, a changé le mode de réduction des minerais. L'abaissement de la température produit, dans toute la zone moyenne et supérieure du fourneau, par l'emploi de l'air chaud, a évidemment diminué la tendance de l'oxyde de fer à passer à l'état de silicate, et facilité, par conséquent, sa réduction complète par l'oxyde de carbone. Dans ces usines, l'économie de combustible doit être rapportée à deux causes : 1° à la quantité de chaleur apportée par l'air; 2° au changement produit dans le mode de réduction des minerais. Cette seconde cause, fort peu influente dans les hauts fourneaux qui roulaient auparavant d'une manière économique, comme ceux d'Audincourt, devait, au contraire, produire de grands changements dans le roulement de ceux qui consommaient beaucoup de combustible.

Sur l'emploi de la vapeur d'eau. — Quelques métallurgistes ont pensé que l'emploi de la vapeur d'eau comme agent de combustion pourrait être très-avantageux dans les hauts fourneaux. Ils s'appuient sur la composition de ce corps qui renferme 0,89 d'oxygène pour conjecturer que la combustion du charbon dans la vapeur d'eau produirait une température beaucoup plus élevée que dans l'air seul. Plusieurs essais dirigés d'après ces vues ont été faits en grand, mais il ne paraît pas qu'aucun d'eux ait réussi. On a trouvé généralement que l'emploi d'une proportion un peu considérable de vapeur avait pour résultat de refroidir, d'une manière très-marquée, toute la partie inférieure du fourneau.

On peut, je crois, rendre raison assez facilement de ces résultats, en s'appuyant sur les expériences de Dulong. La

combustion du charbon en excès dans la vapeur d'eau produit de l'hydrogène et de l'oxyde de carbone qui forment, en brûlant à l'air, de l'eau et de l'acide carbonique. Le charbon brûlé de cette manière ne doit pas dégager plus de chaleur absolue qu'en se combinant directement à l'oxygène. En partant de cette donnée, on trouve que :

1 litre vapeur de carbone décompose 2 litres de vapeur d'eau et produit 2 litres d'hydrogène et 2 litres d'oxyde de carbone.

En brûlant à l'air :

Les 2 litres d'hydrogène produisent	6,260	unités de chaleur.
2 litres oxyde de carbone. . . .	6,260	
	12,520	

Or, 1 litre vapeur carbone ne peut produire que 7,858 unités de chaleur. Il y a donc eu 4,662 unités de chaleur rendues latentes par la décomposition de l'eau au contact du charbon.

L'effet de la vapeur d'eau doit donc être tout à fait pareil à celui qu'on obtiendrait en lançant un volume égal d'acide carbonique dans le fourneau. L'hydrogène et l'oxyde de carbone se comportent tout à fait de la même manière. Ils se combinent en brûlant avec la même quantité d'oxygène et produisent, à volume égal, la même quantité de chaleur et des volumes égaux de vapeur d'eau et d'acide carbonique. En lançant de la vapeur d'eau dans le fourneau, on refroidira donc la partie inférieure de l'appareil et l'on augmentera la proportion des gaz combustibles dans la flamme du gueulard.

Résumé.

En résumé, les résultats contenus dans ce Mémoire me paraissent représenter d'une manière simple l'ensemble des réactions qui se passent dans un haut fourneau entre l'air, le charbon et les minerais.

Ils font voir quel est le rôle qui appartient aux différentes parties du haut fourneau dans la préparation métallurgique du minerai.

Ils montrent que l'oxygène contenu dans l'air injecté se change très-rapidement en acide carbonique, puis en oxyde de carbone; que ces deux transformations s'opèrent successivement à une faible distance de la tuyère, et déterminent les limites de la zone que les métallurgistes appellent la zone de fusion.

J'ai fait voir que l'oxyde de fer se réduit à l'état métallique de deux manières distinctes qui paraissent dépendre de son mode de combinaison. L'oxyde de fer à l'état de liberté se réduit sur toute la hauteur de la cuve du fourneau par la transformation de l'oxyde de carbone en acide carbonique, sans consommation de charbon. L'oxyde de fer combiné à la silice ne se réduit que dans les parties inférieures de l'appareil sous l'influence d'une température élevée en produisant de l'oxyde de carbone et en consommant par conséquent une quantité correspondante de combustible.

La nature chimique du minerai employé est donc une des circonstances qui doivent occasionner les plus grandes variations d'un fourneau à l'autre dans la composition du courant de gaz. Elle détermine aussi, comme on l'a vu, les différences que l'on remarque dans les profils intérieurs des hauts fourneaux.

Les moindres variations dans l'allure du fourneau sont accompagnées de changements correspondants dans la nature des produits gazeux. L'analyse comparative de ceux-ci permettrait donc d'apprécier l'influence des causes qui produisent les dérangements, les accidents de toute espèce que l'on n'observe que trop souvent dans les usines.

J'ai admis, dans ce travail, que la réduction des dernières portions d'oxyde de fer, dans la partie inférieure du fourneau, s'opérait directement par la réaction du carbone sur cet oxyde. Les résultats que j'ai déduits de mes

expériences sont, au surplus, tout à fait indépendants de cette manière d'expliquer les faits observés. Je n'ai pas cru devoir adopter complétement, à cet égard, les vues ingénieuses que M. Leplay a récemment développées et appliquées, dans un travail remarquable (1), à la théorie de la cémentation des corps oxydés et des fourneaux à tuyères. L'existence d'oxydes fixes, irréductibles par l'oxyde de carbone et par cémentation, et réductibles par le charbon à l'état de mélange intime, comme ceux de manganèse, de chrome, de titane, m'a paru établir ce fait, que le charbon agit effectivement comme réductif par son contact avec des solides. L'action produite par le chlore gazeux à une température élevée, sur un mélange intime de charbon et d'oxyde terreux, comme l'alumine, serait tout à fait inexplicable si l'on n'admettait pas l'existence d'une affinité chimique entre les molécules des deux corps infusibles et fixes qui sont en présence. Le chlore n'agit séparément ni sur le charbon, ni sur la terre, et on ne voit pas comment il pourrait servir de véhicule pour déterminer ici la combinaison de l'oxygène avec le carbone, s'il n'y avait aucune action de contact entre le charbon et l'oxyde.

VI.

Recherches sur la composition des gaz produits dans les hauts fourneaux. (Troisième Mémoire.)

Les expériences qui font le sujet de ce Mémoire forment la continuation et le complément de celles que j'avais entreprises, en suite d'une mission de M. le sous-secrétaire d'État des Travaux publics, sur la composition des gaz produits

(1) *Annales des Mines*, tome XIX, page 267.

dans les opérations de la métallurgie du fer. Ces premiers travaux, dont les résultats ont été consignés dans les deux Mémoires qui précèdent (pages 224 et 258), avaient été exécutés dans les usines où l'on ne consommait que du charbon de bois. Il m'a paru utile d'étudier, sous le même point de vue, les opérations que l'on exécute avec des combustibles minéraux, la houille et le coke. Ces recherches, comme celles dont je m'étais précédemment occupé, devaient servir tout à la fois à l'explication théorique des phénomènes qui se passent dans l'appareil métallurgique, et à la détermination de la puissance calorifique des produits gazeux.

Je dois à l'amitié de M. Victor Frèrejean d'avoir pu exécuter ce travail dans l'importante usine de Pont-l'Évêque, près Vienne (Isère), qui comprend un haut fourneau au coke, des fours à puddler et à réchauffer, un feu d'affinerie à la comtoise, des fours à tôle et des ateliers pour le raffinage et le laminage du cuivre. Enfin, depuis le mois de juin 1843, cet habile maître de forges employait d'une manière suivie les gaz de son haut fourneau pour alimenter un four à réverbère de mazerie, et les résultats obtenus avaient été des plus satisfaisants.

J'ai fait également une série d'expériences sur les gaz du haut fourneau et d'un des cubilots de l'usine de Vienne, exploitée par MM. Bonnet, Merle, de Piellat et Cie, qui se sont prêtés avec beaucoup de complaisance à toutes les dispositions nécessaires pour l'extraction des gaz. Je leur en fais ici mes remercîments.

J'ai réuni, dans ce Mémoire, toutes les expériences faites dans les usines de Vienne et de Pont-l'Évêque. J'en présenterai successivement les résultats dans l'ordre suivant :

1° Analyse des gaz des hauts fourneaux de Vienne et de Pont-l'Évêque;

2° Analyse des gaz de deux cubilots au coke.

Je n'ai rien à ajouter aux indications que j'ai données dans mes précédents Mémoires sur les procédés suivis pour

recueillir et analyser les gaz produits. Ces procédé éprouvé aucune modification.

Analyse des gaz du haut fourneau de Vienne.

Le haut fourneau de Vienne marche habituellem fonte grise de moulage; ses dimensions principales s suivantes :

	m
Diamètre au gueulard.....	1,300
Diamètre au ventre.....	3,150
Hauteur de la cuve.....	6,365
Hauteur des étalages..	1,700
Diamètre au sommet de l'ouvrage.	1,300
Hauteur de l'ouvrage.....	1,700
Largeur entre les deux tuyères...	0,860
Hauteur du creuset....	0,360
Hauteur totale du fourneau.....	10,125

Marche du haut fourneau. — Le vent est lancé d fourneau par deux buses de $0^m,061$ de diamètre. Les t sont rondes et leur diamètre est de $0^m,067$. La pressi vent est habituellement de $0^m,04$ de mercure, et sa t rature est comprise entre 220 et 250 degrés centigrad

Nature du minerai. — Les minerais employés sont : minerai de la Voulte, qui arrive à l'usine tout grillé; minerai hydroxydé oolitique exploité à Saint-Q (Isère) à la base du premier étage jurassique; 3° du rai en grain des environs d'Autrey (Haute-Saône).

La charge est composée de la manière suivante :

		kil	
Coke de Rive-de-Gier, 8 rasses pesant.		232	
Minerais grillés.	Minerai riche de la Voulte...	25,0	275 k
	Minerai carbonaté de la Voulte.	87,5	
Minerai de Saint-Quentin non grillé...		125,0	
Minerai en grains d'Autrey..... ..		25,0	
Castine.....		12,5	

Consommation et produits. — Pendant le mois d

embre 1843, la consommation du haut fourneau, rapportée aux 100 kilogrammes de fonte, a été la suivante :

	kil	
Coke	285,00	
Minerai de la Voulte	148,19	344,09
Id. Saint-Quentin	163,43	
Id. en grains	32,47	
Castine	25,33	
Rendement des minerais	29 pour 100	
Nombre de charges en 12 heures	26,50	
Produit moyen par charge	$73^{kil},27$	
— en 12 heures	$1985^{kil},00$	

L'appareil à air chaud du haut fourneau est alimenté par une prise de gaz qui a lieu à 1 mètre au-dessous du gueulard par trois ouvertures rectangulaires de $0^m,16$ de hauteur sur $0^m,23$ de largeur. Les gaz se réunissent dans un conduit unique, et s'enflamment naturellement à leur entrée dans le four à air chaud.

J'ai aspiré des gaz en quatre points différents du haut fourneau : 1° à la tympe, à $0^m,62$ au-dessus du niveau des tuyères; 2° à 2 mètres au-dessus des étalages ; 3° à 1 mètre au-dessous du gueulard; 4° enfin au gueulard.

Expériences N°s 1 *et* 2.

Gaz pris à la tympe, à $0^m,62$ *au-dessus du niveau des tuyères.* — Un trou a été percé dans la maçonnerie, entre deux pierres d'ouvrage; il donnait issue à une flamme blanche qui déposait une poussière très-ténue et d'une blancheur éclatante. Le gaz a été aspiré au moyen d'un canon de fusil muni intérieurement d'un tube de porcelaine et communiquant par un tuyau en plomb avec l'aspirateur. Voici les données de deux expériences :

	(1)	(2)
Gaz	$1^{lit},575$	$1^{lit},470$
Baromètre	$0^m,754,5$	$0^m,753$
Thermomètre	21°,5	18°,5
Gaz réduit à 0° et à $0^m,760$	$1^{lit},444$	$1^{lit},359$

		gr	gr
Acide carbonique		0,020	0,018
Produits de la combustion.	Eau	0,019	0,012
	Acide carbonique	1,018	0,025
	Oxygène absorbé	0,380	»

Ces nombres conduisent aux résultats suivants :

	(1)	(2)	Moyenne.
Acide carbonique.	0,70	0,66	0,68
Oxyde de carbone.	35,59	38,09	36,84
Hydrogène	1,63	1,18	1,41
Azote	62,08	60,07	61,07
	100,00	100,00	100,09

Expériences N°s 3 *à* 5.

Gaz aspirés à 2^m,00 *au-dessus des étalages et à* 4^m *au-dessous du gueulard.* — Un trou percé au fleuret dar maçonnerie a servi à l'introduction d'un canon de f garni intérieurement d'un tube de porcelaine. Le gaz sortait par ce tuyau brûlait à l'air avec une flamme bleu et déposait une poussière blanche. On a obtenu, dans t analyses, les nombres suivants :

		(3)	(4)	(5)
Gaz pour l'analyse		1^lit,540	1^lit,560	1^lit,5
Baromètre		0^m,751	0^m,748	0^m,7
Thermomètre		19°	20°	17°,
Gaz ramené à 0° et à 0^m,760		1^lit,422	1^lit,431	1^lit,4
		gr	gr	gr
Acide carbonique		0,013	0,013	0,02
Produits de la combustion.	Eau	0,017	0,017	0,01
	Acide carbonique.	0,948	0,966	0,93
	Oxygène absorbé.	0,358	»	»
Dosage direct d'azote		65,2	64,2	63,1

Ces nombres donnent comme résultat :

	(3)	(4)	(5)	Moyen
Acide carbonique	0,46	0,46	0,79	0,5
Oxyde de carbone	33,65	34,08	32,44	33,5
Hydrogène	1,55	1,48	1,10	1,3
Azote	64,34	63,98	65,67	64,6
	100,00	100,00	100,00	100,0

Expériences N°s 6 *à* 11.

Gaz aspirés à 1^m,00 *au-dessous du gueulard.* — Le gaz a été aspiré dans le conduit qui alimente le four où se trouve l'appareil à air chaud. En déplaçant légèrement l'une des briques qui recouvrent le canal, le gaz s'en échappait avec pression et s'enflammait spontanément à l'air. Sa chaleur propre était assez considérable pour que le verre s'y ramollît très-promptement. L'antimoine fondait rapidement dans la conduite, mais non l'argent. Pour aspirer le gaz, j'ai employé un tube de porcelaine recouvert d'une feuille mince de platine. Un tuyau en plomb faisait communiquer le tube de porcelaine avec l'aspirateur au moyen de deux tubes de caoutchouc.

J'ai fait six analyses de ce gaz, savoir :

		(6)	(7)	(8)
Gaz pour l'analyse		1^lit,500	1^lit,400	1^lit,560
Baromètre		0^m,758	0^m,756	0^m,757
Thermomètre		14°,5	15°,5	15°,5
Gaz ramené à 0° et à 0^m,760		1^lit,421	1^lit,317	1^lit,471
		gr	gr	gr
Acide carbonique		0,017	0,097	0,071
Produits de la combustion.	Eau	0,020	0,018	0,023
	Acide carbonique	0,876	0,824	0,879
	Oxygène absorbé	0,326	»	»
Dosage direct d'azote		63,1	63,2	65,2

		(9)	(10)	(11)
Gaz pour l'analyse		1^lit,588	1^lit,575	1^lit,525
Baromètre		0^m,758	0^m,755	0^m,747
Thermomètre		18°,5	22°	22°
Gaz ramené à 0° et à 0^m,760		1^lit,482	1^lit,448	1^lit,386
		gr	gr	gr
Acide carbonique		0,060	0,058	0,071
Produits de la combustion.	Eau	0,022	0,021	0,021
	Acide carbonique	0,982	0,919	0,898
	Oxygène absorbé	0,370	0,349	»
Dosage direct d'azote		63,1	64,2	63,9

Ces analyses m'ont donné les résultats suivants (1) :

	(6)	(7)	(8)
Acide carbonique	3,80	3,72	2,44
Oxyde de carbone	31,14	31,58	30,18
Hydrogène	1,74	1,69	1,95
Azote	63,32	63,01	65,43
Totaux	100,00	100,00	100,00

	(9)	(10)	(11)
Acide carbonique	2,04	2,02	2,59
Oxyde de carbone	33,46	31,95	32,72
Hydrogène	1,85	1,79	1,87
Azote	62,65	64,24	63,02
Totaux	100,00	100,00	100,00

La composition moyenne du gaz est donc :

Acide carbonique	2,77
Oxyde de carbone	31,13
Hydrogène	1,81
Azote	63,59
	100,00

J'ai cherché à déterminer la proportion de vapeur d'eau contenue dans ces gaz. J'en ai trouvé une quantité tout à fait négligeable, $0^{gr},006$ pour 1 litre de gaz aspiré.

Expériences N°s 12 *à* 14.

Gaz aspirés au gueulard. — Les gaz ont été aspirés au moyen d'un canon de fusil recourbé, et plongeant dans

(1) Le gaz (7) est le même que celui de l'expérience (6). Il est resté deux heures de plus dans l'aspirateur à couche d'huile.

le gueulard de $0^m,15$; il était garni intérieurement d'un tube de porcelaine dans la partie exposée au feu. J'ai obtenu dans trois expériences :

		(12)	(13)	(14)
Gaz pour l'analyse.....		$1^{lit},530$	$1^{lit},590$	$1^{lit},556$
Baromètre.....		$0^m,7505$	$0^m,750$	$0^m,745$
Thermomètre.....		20°	20°,2	21°
Gaz ramené à 0° et à $0^m,760$...		$1^{lit},407$	$1^{lit},456$	$1^{lit},420$
Acide carbonique.....		gr 0,374	gr 0,365	gr 0,243
Produits de la combustion.	Eau.....	0,032	0,029	0,025
	Acide carbonique.	0,645	0,689	0,806
	Oxygène absorbé.	0,260	»	»
Dosage direct d'azote.....		61,1	61,3	60,1

Ce qui donne les nombres :

	(12)	(13)	(14)	Moyenne.
Acide carbonique..	13,44	12,66	8,66	11,58
Oxyde de carbone..	23,15	23,90	28,66	25,24
Hydrogène.....	2,81	2,47	2,18	2,48
Azote.....	60,60	60,97	60,52	60,70
	100,00	100,00	100,00	100,00

Les gaz (12) et (13) ont été aspirés immédiatement l'un après l'autre; le gaz (14) a été aspiré en même temps que le gaz (11) pris à 1 mètre au-dessus du gueulard.

J'ai déterminé la proportion de vapeur d'eau contenue dans les gaz au gueulard, immédiatement après les prises de gaz (13) et (14), à peu près au milieu de l'intervalle de temps compris entre deux charges, et j'ai obtenu :

	(13)	(14)
Vapeur d'eau pour 100 volumes de gaz sec.	6,30	5,45

On peut déjà remarquer qu'il y a une grande différence entre la composition des gaz pris au gueulard, et celle des gaz aspirés à 1 mètre au-dessous. Les variations qu'on observe dans la composition des gaz pris au gueulard (12), (13), (14) tiennent évidemment à ce qu'une partie plus

ou moins considérable du courant ascendant se rendait, par le conduit placé à 1 mètre de profondeur, dans le four où se trouvait l'appareil à air chaud. Il en résultait des variations correspondantes dans le volume des gaz qui passaient à travers le minerai, et partant, dans leur composition à la sortie du fourneau. Je reviendrai, du reste, plus tard sur ces résultats.

Analyse des gaz du haut fourneau de Pont-l'Évêque.

Le haut fourneau était remis en feu depuis trois semaines, lorsque j'ai commencé mes expériences. Voici quelles sont ses principales dimensions :

	m
Diamètre au gueulard	1,25
Diamètre au ventre	3,00
Hauteur de la cuve	7,15
Hauteur des étalages	2,55
Diamètre au sommet de l'ouvrage	1,00
Hauteur de l'ouvrage	0,80
Largeur entre les deux tuyères	0,75
Hauteur du creuset	0,50
Hauteur totale du fourneau	11,00

Marche du haut fourneau. — Le fourneau est soufflé au vent chaud. L'appareil pour le chauffage de l'air est disposé à la suite d'un four à réverbère servant au mazéage de la fonte, et qui est alimenté par les gaz du haut fourneau pris à $3^m,65$ de profondeur au-dessous du gueulard. Pendant la durée de mes expériences, la température du vent, près de la tuyère, n'a pas dépassé 130 degrés.

Le fourneau a deux tuyères à eau en fer de $0^m,072$ de diamètre. Les buses ont un diamètre de $0^m,067$. La pression de l'air sur le porte-vent était comprise entre 35 et 40 centimètres d'eau ($0^m,026$ à $0^m,030$ de mercure).

Nature du minerai. — Le haut fourneau consomme principalement du minerai oolitique de Saint-Quentin (Isère),

que l'on grille dans des fours analogues aux fours à chaux continus, en employant pour cette opération des escarbilles des fours à réverbère. Ce grillage enlève l'eau et une partie de l'acide carbonique du minerai. Le lit de fusion comprend en même temps des scories de forges de Rives et du minerai en grains de la Haute-Saône.

Consommation et produits. — Pendant mes expériences, le fourneau n'était pas encore arrivé tout à fait à sa portée de minerai, mais il n'en différait que de 5 à 6 pour 100, à en juger par les résultats du fondage précédent. La charge se composait de 253 kilogrammes de minerais divers et de 150 kilogrammes de coke. Elle rendait 75 kilogrammes de fonte ou 30 pour 100. On passait moyennement 24 charges en 12 heures, et l'on obtenait pendant le même temps 1,800 kilogrammes de fonte blanche ou truitée pour affinage.

Les gaz du haut fourneau de Pont-l'Évêque ont pu être aspirés en un assez grand nombre de points : 1° dans le voisinage des tuyères; 2° vers la partie supérieure de l'ouvrage; 3° au grand ventre du fourneau; 4° dans la prise de gaz située à $3^m,50$ au-dessus des étalages et à la moitié de la hauteur de la cuve; 5° enfin, au gueulard.

Expériences N°s 15 *et* 16.

Gaz aspirés dans le voisinage de la tuyère. — L'intervalle qui se trouve entre les tuyères et les parois du vide rectangulaire dans lequel elles sont établies, était rempli par du sable réfractaire fortement tassé. On a pu percer facilement, dans ce vêtement de sable, deux ouvertures de $0^m,02$ de diamètre placées dans la verticale qui passe par le centre de la tuyère, l'une à $0^m,24$, l'autre à $0^m,29$ au-dessus du centre. Les gaz s'en échappaient avec force en projetant à l'extérieur de petits fragments de coke et des gouttelettes de fonte et de laitier. En introduisant dans ces orifices un petit tube de porcelaine revêtu extérieurement d'une feuille

de platine et communiquant avec l'aspirateur, on a pu recueillir les gaz sans trop de difficulté. Voici les données des expériences :

		(15)	(16)
Gaz pour l'analyse		$1^{lit},510$	$1^{lit},570$
Baromètre		$0^{m},746$	$0^{m},746$
Thermomètre		14°,5	15°
Gaz à 0° et à $0^{m},760$		$1^{lit},408$	$1^{lit},461$
		gr	gr
Acide carbonique		0,226	0,170
Produits de la combustion	Eau	0,003	0,008
	Acide carbonique	0,461	0,644
	Oxygène absorbé	»	»

Elles ont conduit aux résultats suivants :

	(15)	(16)
Acide carbonique	8,11	5,87
Oxyde de carbone	16,53	22,25
Hydrogène	0,26	0,68
Azote	75,10	71,20
	100,00	100,00

Les gaz de l'expérience (15) provenaient de l'orifice percé à $0^{m},24$ au-dessus des tuyères. Les gaz de l'expérience (16) provenaient de l'orifice à $0^{m},29$ de la tuyère.

Il a été facile de comparer les températures des matières contenues dans le haut fourneau devant la tuyère, à $0^{m},24$ et à $0^{m},29$ au-dessus. La tuyère paraissait d'un blanc éblouissant. A $0^{m},24$, et surtout à $0^{m},29$ au-dessus, la teinte était déjà très-sensiblement jaune. La comparaison était facile à faire, les trois orifices étant disposés sur la même verticale.

Expérience N° 17.

Gaz aspirés à la rustine, à $0^{m},67$ *au-dessus du niveau des tuyères.* — Les gaz sortaient avec force de l'orifice pratiqué dans la maçonnerie, et l'intérieur du fourneau à cette hau-

teur paraissait d'un rouge très-clair. J'ai obtenu dans une seule analyse :

		(17)
Gaz pour l'analyse		$1^{lit},610$
Baromètre		$0^{m},749$
Thermomètre		15°
Gaz à 0° et à $0^{m},760$		$1^{lit},503$
		gr
Acide carbonique		0,005
Produits de la combustion	Eau	0,012
	Acide carbonique	1,076
	Oxygène absorbé	0,390
Dosage d'azote		62,1

Ces nombres conduisent aux résultats suivants :

	(17)
Acide carbonique	0,16
Oxyde de carbone	36,15
Hydrogène	0,99
Azote	62,70
	100,00

Expériences N°s 18 *et* 19.

Gaz pris au grand ventre du fourneau. — Deux analyses faites sur des gaz aspirés séparément par une ouverture pratiquée dans la maçonnerie du fourneau et de laquelle les gaz sortaient avec une grande vitesse, ont donné :

		(18)	(19)
Gaz pour l'analyse		$1^{lit},564$	$1^{lit},560$
Baromètre		$0^{m},766$	$0^{m},754$
Thermomètre		14°	16°
Gaz à 0° et à $0^{m},760$		$1^{lit},480$	$1^{lit},452$
		gr	gr
Acide carbonique		0,005	0,005
Produits de la combustion	Eau	0,017	0,015
	Acide carbonique	1,004	0,977
	Oxygène absorbé	»	»
Dosage d'azote		63,6	65,1

Ces nombres conduisent aux résultats suivants :

	(18)	(19)	Moyenne.
Acide carbonique.....	0,17	0,17	0,17
Oxyde de carbone.....	34,26	33,75	34,01
Hydrogène.....	1,43	1,27	1,35
Azote.....	64,14	64,81	64,47
	100,00	100,00	100,00

Expériences N°s 20 *et* 21.

Gaz aspirés à la moitié de la hauteur de la cuve. — Le gaz ont été aspirés dans la conduite qui alimente le four mazer, tout près de leur sortie du fourneau. Deux analyse faites sur des gaz aspirés séparément ont eu pour base le données suivantes :

		(20)	(21)
Gaz pour l'analyse.....		$1^{lit},604$	$1^{lit},578$
Baromètre.....		$0^{m},7565$	$0^{m},7555$
Thermomètre.....		11°	13°
Gaz à 0° et à $0^{m},760$.....		$1^{lit},5345$	$1^{lit},4972$
Acide carbonique.....		$0^{gr},018$	$0^{gr},023$
Produits de la combustion.	Eau.....	0,016	0,020
	Acide carbonique...	1,083	1,026
	Oxygène absorbé....	0,393	»
Dosage d'azote.....		62,9	62,9

Ces nombres conduisent aux résultats suivants :

	(20)	(21)	Moyenne.
Acide carbonique.....	0,59	0,77	0,68
Oxyde de carbone.....	35,64	34,61	35,12
Hydrogène.....	1,30	1,66	1,48
Azote.....	62,47	62,96	62,72
	100,00	100,00	100,00

La température des gaz à leur entrée dans la conduit était le rouge sombre; le verre s'y ramollissait très-pompte ment. Près du four à gaz, cette température suffisait encor

pour produire la fusion du zinc, mais non celle de l'antimoine.

Expériences N°s 22 *et* 23.

Gaz pris au gueulard. — Les gaz ont été aspirés au gueulard à peu près au milieu de l'intervalle de temps compris entre deux charges, pendant le roulement du four à gaz. Deux analyses faites sur des gaz aspirés séparément ont donné :

		(22)	(23)
Gaz pour l'analyse		1^lit,595	1^lit,590
Baromètre		0^m,760	0^m,759
Thermomètre		14°,2	14°,8
Gaz ramené à 0° et à 0^m,760		1^lit,516	1^lit,506
Acide carbonique		gr 0,188	gr 0,240
Produits de la combustion.	Eau	0,025	0,024
	Acide carbonique	0,870	0,828
	Oxygène absorbé	»	»
Dosage d'azote		62,7	62,6

Ces nombres donnent les résultats qui suivent :

	(22)	(23)	Moyenne.
Acide carbonique	6,26	8,04	7,15
Oxyde de carbone	28,98	27,76	28,37
Hydrogène	2,04	1,98	2,01
Azote	62,72	62,22	62,47
	100,00	100,00	100,00

Je n'ai pu déterminer la proportion de vapeur d'eau contenue dans les gaz au gueulard; mais cette quantité ne peut être que très-faible, puisqu'on n'emploie à peu près que des minerais grillés dans le lit de fusion.

Recherche du soufre dans les gaz du haut fourneau.

Dans toutes les expériences dont je viens de donner les résultats, je n'ai pas fait mention des composés du soufre qui pourraient cependant se rencontrer dans les gaz, puis-

qu'il existe du sulfure de fer en proportion notable dans les combustibles qu'on brûle dans le haut fourneau. J'ai fait quelques expériences spéciales pour reconnaître s'il y avait du soufre dans les gaz, et à quel état il s'y rencontrerait.

En faisant passer le gaz aspiré au sommet, au milieu et à la base de la cuve, dans une solution d'acétate de plomb, la liqueur n'a pas noirci, bien que j'aie opéré sur un volume très-considérable de gaz.

Il n'existe pas non plus d'acide sulfureux dans les gaz pris aux trois hauteurs que j'ai indiquées. Je m'en suis assuré en faisant passer ces gaz à travers une dissolution aqueuse de chlore. La liqueur essayée par le chlorure de barium, après le passage des gaz, ne s'est pas troublée; elle ne renfermait donc pas une trace d'acide sulfurique.

Enfin, pour reconnaître s'il existait du soufre dans les gaz, autrement qu'à l'état d'acide sulfureux ou d'hydrogène sulfuré, j'ai examiné les produits de la combustion dans le four à gaz. Il est bien évident que tous les composés du soufre devaient donner, dans cette combustion, de l'acide sulfureux. En faisant passer un très-grand volume de gaz à travers la dissolution de chlore, j'ai obtenu un trouble sensible par le chlorure de barium; mais, en recommençant l'expérience de manière à pouvoir mesurer le gaz aspiré et à doser ainsi l'acide sulfureux, j'ai reconnu que pour $4^{lit},82$ de gaz aspiré à travers la solution de chlore, celle-ci n'avait produit, avec le chlorure de barium, qu'un trouble à peine sensible. Le soufre existe vraisemblablement dans les gaz à l'état de sulfure de carbone, mais la proportion en est tout à fait inappréciable.

En répétant les essais qui précèdent sur des gaz aspirés dans le voisinage des tuyères, à $0^{m},24$ au-dessus (15), on trouve qu'ils noircissent sensiblement la dissolution d'acétate de plomb. Il existerait donc, dans les gaz de cette région du fourneau, une petite quantité d'hydrogène sulfuré qui se formerait probablement par la réaction de la

vapeur d'eau contenue dans l'air atmosphérique sur le sulfure de fer que renferme le coke. Il est fort curieux de voir l'hydrogène sulfuré se former ainsi à une température aussi élevée que celle produite dans le voisinage des tuyères. Ce gaz est sans doute décomposé par le fer ou par la chaux qu'il rencontre en s'élevant dans le fourneau, puisqu'on n'en trouve plus de traces à une certaine hauteur dans l'appareil. Tout le soufre se retrouve dans les produits fixes de l'opération, soit dans la fonte à l'état de sulfure de fer, soit dans le laitier à l'état de sulfure de calcium, comme l'a démontré M. Berthier. Quand on brûle du coke dans un fourneau à cuve, dans le but unique de produire des gaz combustibles, l'hydrogène sulfuré formé devant les tuyères persiste sur toute la hauteur du générateur, et se retrouve en proportion appréciable dans les gaz qu'on utilise. Je reviendrai plus loin sur ces expériences.

Expériences sur la température des hauts fourneaux.

Avant de comparer les résultats des expériences qui précèdent, soit entre eux, soit avec les résultats analogues obtenus dans les fourneaux alimentés au charbon de bois, je vais rapporter ici quelques expériences faites pour déterminer approximativement la température des hauts fourneaux au coke et au charbon de bois en différents points de leur hauteur. Ces observations ont été faites en introduisant dans le fourneau des fils ou des fragments de différents métaux inégalement fusibles. On arrivait ainsi à connaître deux métaux, dont l'un fondait, dont l'autre ne fondait pas sous l'influence de la température du milieu ambiant, et celle-ci se trouvait ainsi comprise entre deux limites. J'inscris ici mes premiers résultats, mais seulement comme de simples renseignements. J'espère pouvoir présenter plus tard sur ce sujet un travail plus approfondi et en comparer les indications avec les résultats des belles recherches faites

par M. Pouillet sur la détermination des hautes t
tures (1).

Pour introduire les métaux dans le fourneau, j'er
une tige de fer, à l'extrémité de laquelle se trou
cavité disposée pour recevoir un très-petit creuset
tenait le métal essayé, et cette cavité était recouv
une plaque en fer vissée sur la tige pour mainteni
vercle du creuset. Dans d'autres expériences, un
got du métal essayé était simplement fixé au bout d
en fer et introduit dans le fourneau.

Haut fourneau d'Audincourt marchant au charbon

Roulement à l'air froid. — Trois semaines après
en feu, on consommait 306 kilogrammes de miner
pour 5 hectolitres de charbon pesant 115 kilogram
fourneau produisait de la fonte très-grise.

1°. *Température propre des gaz au gueulard.* —

(1) *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. III,
M. Pouillet s'est servi du pyromètre à air pour déterminer la c
lorifique du platine aux diverses températures, et pour gradue
mètre électro-magnétique, dans lequel l'intensité d'un couran
électrique sert à la mesure de la température. Par ces différen
M. Pouillet a pu déterminer, en degrés du thermomètre à air, le
fusion de quelques métaux et les températures correspondantes
degrés d'incandescence. Je rappelle ici les principaux résultats o
M. Pouillet :

	degrés	
Rouge naissant	525	
Rouge sombre	700	
Cerise naissant	800	
Cerise	900	
Cerise clair	1000	fusion de l'argent.
Orangé très-foncé	1050	fusion de la fonte bl
Orangé foncé	1100	fusion de la fonte gri
Orangé clair	1200	fusion de l'or.
Blanc naissant	1300	fusion de l'acier.
Blanc éclatant	1400	
Blanc éblouissant	1500	fusion du fer forgé.
»	1600	

haute, la température propre du courant de gaz n'est pas suffisante pour produire la fusion du soufre (112 degrés).

A charge basse, le soufre fond et reste très-liquide, ce qui prouve que la température du courant n'est pas très-élevée au-dessus de son point de fusion. L'étain ne fond pas. La température des gaz est donc comprise entre 100 degrés et 200 degrés à charge basse.

Je dois ajouter à ces renseignements que très-souvent les gaz des hauts fourneaux au charbon de bois deviennent troubles après la charge en minerai, ce qui prouve que la température s'abaisse assez pour produire la condensation de la vapeur d'eau entraînée par les gaz. Comme cette proportion ne dépasse pas 12 à 13 pour 100 du volume total du gaz, il faut, pour que la condensation de la vapeur puisse s'opérer, que la température du courant s'abaisse, à charge basse, au-dessous de 50 degrés à 60 degrés.

Pour montrer que la température des gaz des fourneaux au charbon de bois est ordinairement très-peu élevée à leur sortie du fourneau, j'indiquerai encore le fait suivant. Au fourneau de Bley (Haute-Saône), en 1840, trois semaines après la mise en feu, les gaz étant éteints au gueulard, on pouvait tenir pendant très-longtemps la main plongée dans le courant sans éprouver autre chose qu'une faible sensation de chaleur.

2°. *Température de la cuve, à* $8^m,04$ *au-dessous du gueulard et à* $0^m,63$ *au-dessus du ventre.* — Je rappellerai que la composition des gaz du fourneau d'Audincourt, à cette hauteur, était la suivante (p. 305) :

Acide carbonique	0,21
Oxyde de carbone	36,39
Hydrogène	1,79
Azote	61,61
	100,00

La tige en fer contenant le petit creuset avec un fil d'ar-

gent est restée un quart d'heure dans le fourneau : elle a été retirée chauffée au rouge cerise clair. L'argent ét fondu.

Le même essai a été répété, en substituant le cuivre rou à l'argent. La tige d'essai est restée 20 minutes dans le fou neau. Le cuivre n'était pas fondu.

La température, dans cette partie du fourneau, est do comprise entre la fusion de l'argent et celle du cuivre, el est supérieure à 1000 degrés.

3°. *Température dans un orifice pratiqué au contrevent,* $0^m,90$ *au-dessus de la tuyère.* — A cette hauteur, l'aci carbonique formé devant la tuyère est déjà complétem changé en oxyde de carbone.

Le cuivre fond; l'or fond également. La tige d'essai r tirée du fourneau après 20 minutes de séjour, est chauff au rouge presque blanc. Elle est recouverte de gouttelett de fonte et de laitier, et creusée d'un grand nombre de p tites cavités produites probablement par la fonte en fusio mais elle ne s'est pas déformée dans le fourneau.

4°. *Température dans la tuyère.* — Le fer fond presque i stantanément. Une tige de fer de $0^m,02$ de diamètres'e complétement fondue sur $0^m,25$ de longueur en moins d'u demi-minute. La porcelaine y fond aussi presque instant nément.

Haut fourneau au coke de Pont-l'Évêque.

1°. *Température au gueulard.* — 29 jours après la mi en feu, le four à gaz étant en roulement.

A charge haute, l'étain fond; le plomb ne fond pas : température est donc comprise entre 228 degrés et 3 degrés.

A charge basse, le plomb et le zinc fondent, mais l'an moine ne fond pas : la température des gaz est donc co prise entre 360 degrés et 430 degrés.

2°. *Température au ventre* — La composition des gaz

représentée par les résultats suivants :

Acide carbonique	0,17
Oxyde de carbone	34,01
Hydrogène	1,35
Azote	64,47
	100,00

Un morceau de cuivre rouge, solidement encastré à l'extrémité d'une tige de fer, fond après 15 minutes de séjour dans le fourneau. La fonte blanche se désagrége, mais ne fond pas.

Le fer est chauffé au rouge cerise clair quand on le retire; en l'examinant après l'avoir trempé, on a reconnu qu'il était recouvert sur $0^m,001$ environ d'épaisseur d'une couche aciéreuse.

3°. *Température à* $0^m,67$ *au-dessus de la tuyère.* — Le gaz avait à cette hauteur la composition qui suit :

Acide carbonique	0,16
Oxyde de carbone	36,15
Hydrogène	0,99
Azote	62,70
	100,00

Le cuivre et l'or fondent facilement.

Une baguette de fer rond, de 9 millimètres de diamètre, reste plongée dans le fourneau, sur une longueur d'environ 1 mètre, pendant 15 minutes; on la retire chauffée au blanc naissant et donnant quelques étincelles à l'air, mais sans être déformée; elle est recouverte d'une couche aciéreuse. La porcelaine n'éprouve aucun changement.

4°. *Température à* $0^m,29$ *au-dessus de la tuyère.* — A cette hauteur les gaz ont la composition donnée page 346, et que je répète ici :

Acide carbonique	5,87
Oxyde de carbone	22,25
Hydrogène	0,68
Azote	71,20
	100,00

Une baguette de fer rond, de 9 millimètres, fond complétement sur une longueur de $0^m,20$, en moins d'une minute et demie. Retirée après trois quarts de minute, elle n'est pas encore fondue, mais elle est chauffée au blanc soudant et donne des étincelles à l'air.

Ces deux expériences ont été répétées, et ont reproduit les mêmes résultats.

5°. *Température à la tuyère.* — La même baguette de fer rond, de 9 millimètres de diamètre, introduite dans le fourneau sur $0^m,30$ de longueur, fond en moins d'une demi-minute. La porcelaine y fond aussi presque instantanément.

Les expériences qui précèdent montrent déjà que la température des hauts fourneaux au coke est notablement plus élevée que celle des fourneaux au charbon de bois dans les mêmes zones de l'appareil. La différence est surtout très-considérable entre les températures des gaz essayées au gueulard, et elle l'aurait été encore davantage, si l'on ne soustrayait pas une partie du courant de gaz, au milieu de la cuve du fourneau au coke, pour alimenter les fours de mazerie. Ces différences de température sont en rapport, comme je le montrerai bientôt, avec les différences qu'on observe dans la composition des gaz pris dans les mêmes régions des deux espèces de fourneaux.

Conclusions.

Pour pouvoir faire la comparaison des fourneaux au charbon de bois et des fourneaux au coke, j'ai réuni, dans les tableaux qui suivent, les résultats des analyses faites sur les gaz des hauts fourneaux de Vienne et de Pont-l'Évêque et j'ai rapporté, pour chaque composition, la proportion de chacun des éléments du mélange gazeux à un même volume (100) du seul élément invariable, l'azote; on peut suivre ainsi plus facilement les modifications qu'éprouve la composition du courant de gaz, lorsqu'on passe d'une zone

à l'autre du haut fourneau. Les résultats des analyses des gaz des deux fourneaux au charbon de bois que j'ai examinés ont été aussi réunis dans deux tableaux disposés d'une manière semblable (p. 314 et 315). Je n'ai pas cru toutefois devoir consigner ici dans ces nouveaux tableaux les compositions calculées en supposant que l'oxygène se change d'abord en acide carbonique, puis en oxyde de carbone. Ces hypothèses, basées sur toutes les expériences que j'ai présentées antérieurement, semblent justifiées du reste aussi bien par les résultats de cette série que par ceux fournis par les fourneaux au charbon de bois.

Haut fourneau de Vienne.

Gaz pris au-dessous du gueulard.	Au gueulard.	A 1m,00.	A 4m,20.	A la tympe.
Acide carbonique....	11,58	2,77	0,57	0,68
Oxyde de carbone.....	25,24	31,83	33,59	36,84
Hydrogène.....	2,48	1,81	1,38	1,41
Azote.....	60,70	63,59	64,66	61,07
Totaux.....	100,00	100,00	100,00	100,00
Vapeur d'eau pour 100 volumes de gaz sec.....	5,9	»	»	»
Vapeur de carbone pour 100 volumes d'azote.....	30,3	27,2	26,4	30,7
Oxygène en excès sur 100 volumes d'azote.....	13,6	3,1	0,6	5,0
Hydrogène pour 100 vol. azote.	4,1	2,8	2,1	2,3

Haut fourneau de Pont-l'Évêque.

Gaz pris	Au gueulard.	A 3m 50 du gueulard.	Au ventre.	A 0m,67 de la tuyère.	A 0m,29 de la tuyère.	A [illegible] de la tuyère.
Acide carbonique.	7,15	0,68	0,17	0,16	5,87	8,[illegible]1
Oxyde de carbone.	28,37	35,12	34,01	36,15	22,25	16,53
Hydrogène.....	2,01	1,48	1,35	0,99	0,68	0,26
Azote.....	62,47	62,72	64,27	62,70	71,20	75,10
Totaux....	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Vapeur de carbone sur 100 vol. azote.	28,4	28,5	26,5	28,9	19,7	16,4
Oxygène en excès sur 100 vol. azote.	7,9	2,8	0,7	2,8	2,4	4,4
Hydrogène sur 100 vol. azote.....	3,2	2,4	2,1	1,6	0,9	0,3

On peut tirer des nombres contenus dans les deux t bleaux qui précèdent les conséquences suivantes, qu'il se intéressant de mettre en regard des conséquences dédui des analyses des gaz des hauts fourneaux au charbon bois.

On voit, dans les deux hauts fourneaux que j'ai étud la quantité d'acide carbonique diminuer rapidement à sure qu'on s'éloigne du gueulard, en même temps l'oxyde de carbone augmente. Au fourneau de l'Evêque, vers la moitié de la hauteur de la cuve, trouve presque plus d'acide carbonique dans les gaz l'oxyde de carbone a augmenté dans une proportio que la somme des volumes de l'acide carboniqu

l'oxyde de carbone reste constante. Le seul phénomène chimique qui se produise depuis le milieu de la hauteur de la cuve jusqu'au gueulard est donc le changement de l'oxyde de carbone en acide carbonique par l'oxygène du minerai.

Dans la moitié inférieure de la cuve, il n'y a plus notablement d'acide carbonique. La vapeur de carbone diminue depuis la prise de gaz pour le mazéage de la fonte (p. 344) (Pont-l'Evêque) jusqu'au ventre, de 28,5 à 26,5, résultat qu'il convient d'attribuer, soit au dégagement de l'acide carbonique du minerai qui se produit dans cette région du fourneau, soit à la fin de la réduction de l'oxyde de fer qui s'opère alors avec consommation de charbon.

Aux étalages, l'acide carbonique a disparu, et la proportion de vapeur de carbone combinée dans le gaz (26,5) diffère très-peu de celle qui correspond au gaz produit par l'air sur le carbone en excès (26,3 de carbone pour 100 volumes d'azote), en sorte qu'on peut en conclure qu'au grand ventre du fourneau la transformation de l'oxyde de fer en fer métallique est à peu près complète.

La proportion d'oxyde de carbone paraît augmenter depuis le ventre à la partie supérieure de l'ouvrage, ainsi que le prouvent les expériences (1), (2), (17). Ce résultat est tout à fait comparable à ceux que j'avais obtenus dans l'analyse des gaz des parties inférieures des fourneaux de Clerval et d'Audincourt, et me paraît pouvoir s'expliquer avec la même facilité. On doit admettre que les matières pâteuses qui recouvrent les parois de l'ouvrage contiennent du silicate de fer qui se réduit au contact du charbon avec production d'oxyde de carbone, en sorte que les gaz arrivant au jour par un orifice percé dans la paroi sont plus riches en oxyde de carbone que la colonne gazeuse qui circule au centre de l'ouvrage.

La proportion d'hydrogène reste toujours très-peu considérable, et ne varie presque pas du ventre jusqu'au gueu-

lard. Ce gaz provient presque en totalité de la décomposition de la vapeur contenue dans l'air injecté par les tuyères.

Enfin, les analyses confirment d'une manière claire les résultats directs des analyses faites à Clerval et à Audincourt, qui prouvaient la conversion successive de l'oxygène de l'air en acide carbonique, puis en oxyde de carbone, à une faible distance de la tuyère.

Si maintenant nous comparons ces résultats avec ceux que présentent les hauts fourneaux au charbon de bois, nous reconnaîtrons de grandes analogies et des différences très-notables. De la tuyère jusqu'au ventre, il y a pour ainsi dire identité, sous le rapport de la composition du courant gazeux, entre les deux espèces de fourneaux. Mais, à partir du ventre jusqu'au gueulard, l'analogie n'est plus aussi complète. Ainsi, dans les deux fourneaux au charbon de bois (Clerval et Audincourt), l'acide carbonique augmentait progressivement depuis le ventre jusqu'au milieu de la cuve, et l'oxyde de carbone diminuait en même temps. Du milieu de la cuve au gueulard, le courant gazeux conservait la même composition et se chargeait seulement d'une certaine proportion de vapeur d'eau. Dans les deux hauts fourneaux au coke, au contraire, c'est dans la moitié supérieure de la cuve que la réduction de l'oxyde de fer par l'oxyde de carbone a principalement lieu.

Les différences dans la position de la zone de réduction tiennent évidemment aux différences que présente la température des gaz, dans les deux espèces de fourneaux, lorsqu'ils arrivent près du gueulard. L'hydroxyde de fer perd son eau vers 300 degrés, et l'action réductive de l'oxyde de carbone et de l'hydrogène ne commence que vers 360 degrés, après la déshydratation du minerai. Dans les hauts fourneaux où la température près du gueulard est très-élevée, comme à Vienne et à Pont-l'Evêque, il est évident que la réduction doit commencer presque aussitôt après l'intro-

duction du minerai dans le fourneau, mais on conçoit qu'il ne peut pas en être de même dans les fourneaux au charbon de bois, dont les gaz ont, près du gueulard, une température beaucoup plus basse.

La transformation de l'acide carbonique en oxyde de carbone par le contact du charbon exige une température beaucoup plus élevée que la réduction de l'oxyde de fer par l'oxyde de carbone. Cette dernière réaction se produira donc seule dans toute la partie supérieure des fourneaux. L'acide carbonique disparaîtra lorsqu'on arrivera dans une zone suffisamment échauffée. Cette zone se trouve placée dans les fourneaux au coke vers le milieu de la cuve; à Clerval et à Audincourt, elle se trouvait très-près du ventre du fourneau. Ces résultats s'expliquent nettement par les faits que j'ai rapportés plus haut, et qui prouvent que la température des fourneaux au coke, essayée dans les mêmes zones, est toujours supérieure à la température des fourneaux au charbon de bois.

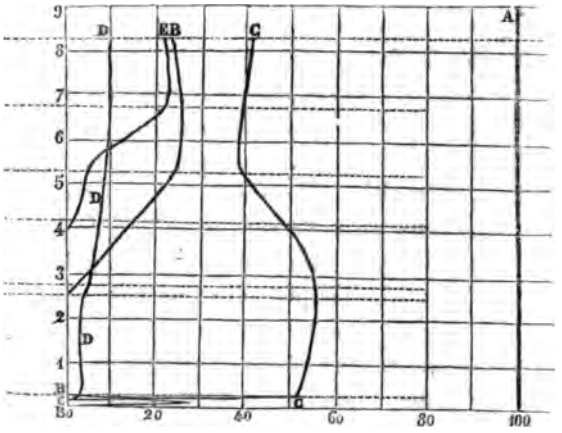
On peut aussi remarquer que les gaz des fourneaux au charbon de bois renferment au gueulard beaucoup plus d'hydrogène que les gaz des fourneaux au coke. En comparant la composition du coke à celle du charbon de bois, on se rend facilement raison de cette différence. Le coke ne perd par calcination en vase clos que 1 à 2 pour 100 de matières volatiles, tandis que le charbon de bois en perd 10 à 15 pour 100, qui renferment beaucoup d'hydrogène.

Afin de faciliter la comparaison des résultats de ce travail avec ceux obtenus précédemment dans les fourneaux au charbon de bois de Clerval et d'Audincourt, j'ai représenté par des courbes continues la marche que suit la proportion de chaque gaz de la tuyère jusqu'au gueulard. Chacune des *fig.* 1 A et B, 2 A et B, 3 A et B, 4 A et B, correspond à un fourneau séparé. Les ordonnées inscrites sur l'axe des y indiquent la hauteur au-dessus de la tuyère. Les abscisses

représentent la proportion de chaque gaz correspondante à la hauteur déterminée par l'ordonnée (1).

Pour que la courbe représentât les variations absolues

Fig. 1. A. — *Haut fourneau de Clerval.*

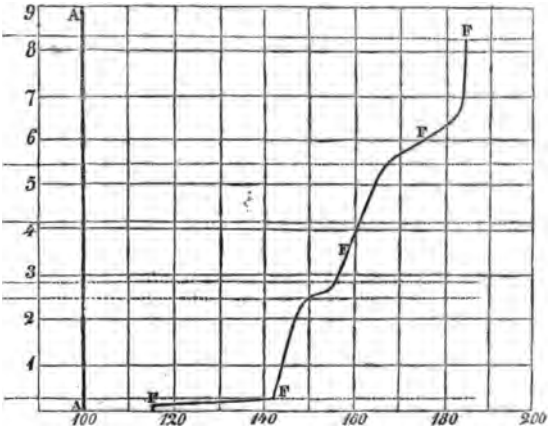


qui surviennent dans la proportion de chaque gaz, passant d'une zone à l'autre du fourneau, il fallait q la composition du mélange gazeux fût constamment ra portée à une proportion constante d'un élément in riable sur toute la hauteur du fourneau. Comme la qu tité absolue d'azote qui sort du gueulard est la même celle qui entre par la tuyère, on a calculé les résultats chaque analyse, en les rapportant à 100 volumes d'az t L'azote sera donc représenté sur chaque figure par ligne droite AA ($x = 100$) parallèle à l'axe des y. Cha qu analyse donne un point de la courbe cherchée, et tous ce points ont été réunis par une ligne continue. J'ai rep ré- senté par des lignes ponctuées les hauteurs au-dessus de la tuyère correspondantes à chacune des analyses.

(1) Le rapport entre les ordonnées et les abscisses est indéterminé et arbitraire, mais il est le même pour tous les fourneaux.

Dans les deux fourneaux au charbon de bois de Clerval d'Audincourt, les deux courbes BBB, CCC, qui représentent l'acide carbonique et l'oxyde de carbone, sont à

Fig. 1. B. — *Haut fourneau de Clerval.*



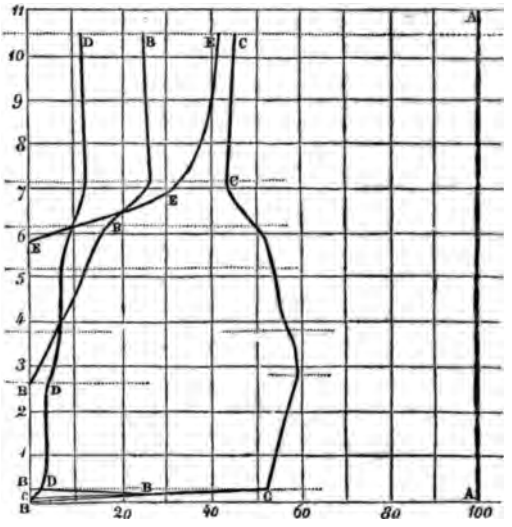
:u près parallèles à l'axe des y, dans la partie supérieure ı fourneau, ce qui montre que les proportions respectives ces deux gaz restent sensiblement constantes jusqu'à une rtaine profondeur. En s'enfonçant davantage, la courbe 3 se rapproche de l'axe des y, et finit par l'atteindre à ıe profondeur qui correspond à peu près au grand ventre . fourneau, tandis que la courbe CCC s'éloigne de plus plus de cet axe, jusqu'à une certaine distance maximum .i correspond également au grand ventre du fourneau. acide carbonique reparaît près de la tuyère, et j'ai admis .'à $0^m,30$ au-dessus il n'en restait plus notablement, en rte que la courbe est représentée par une ligne brisée BBB, .i part de l'origine des coordonnées et s'infléchit brusque-ɜnt en un point

$$\left\{ \begin{array}{l} y = 0^m,15 \\ x = 26,26 \end{array} \right\}$$

ur venir rejoindre l'axe des y à $0^m,30$ au-dessus de la yère. Quant à la courbe CCC, à partir du point qui cor-

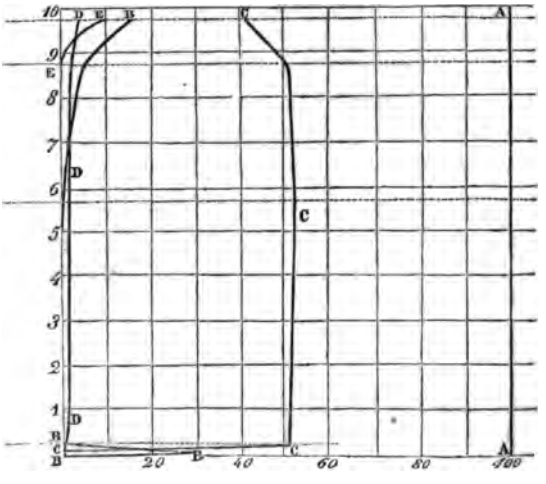
ond à l'abscisse maximum, et qui se trouve à peu près hauteur des étalages, elle se rapproche sensiblement de

Fig. 2. A. — *Haut fourneau d'Audincourt.*



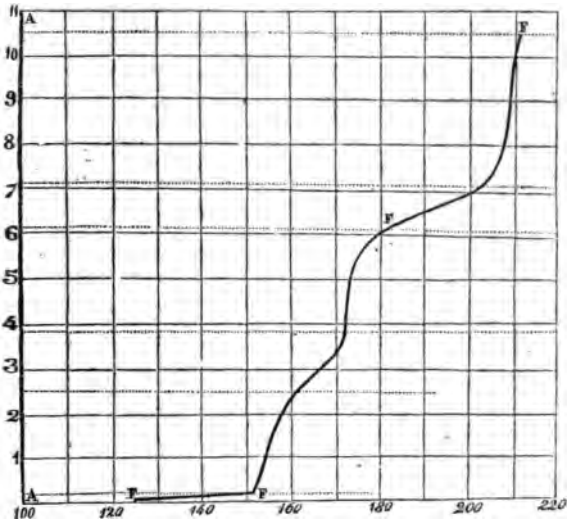
l'axe des y jusqu'à la hauteur $y = 0^m,30$, où elle s'infléc brusquement pour atteindre cet axe à $y = 0^m,15$, haute

Fig. 3 A. — *Haut fourneau de Vienne.*



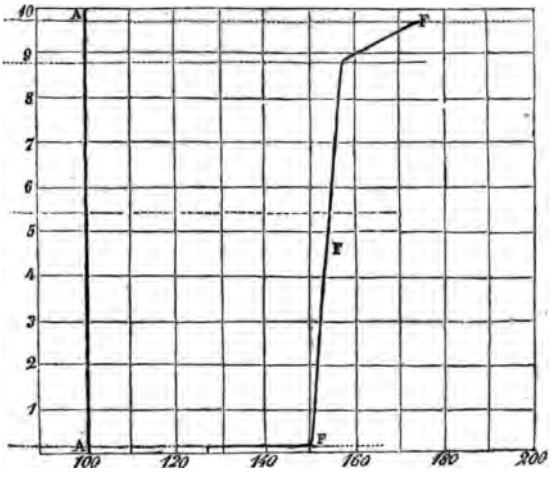
correspondante à 26,26 d'acide carbonique pour 100 volumes d'azote.

Fig. 2. B. — *Haut fourneau d'Audincourt.*



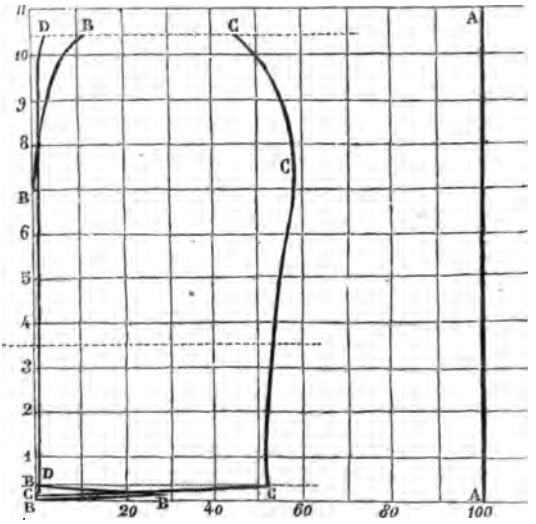
Dans les fourneaux de Vienne et de Pont-l'Evêque (*fig.* 3 et 4), les courbes BBB, CCC, s'infléchissent immédiate-

Fig. 3. B. — *Haut fourneau de Vienne.*



ment à partir du gueulard (1). On voit ici, comme dans deux fourneaux au charbon de bois, que, la courbe BBB rapprochant de l'axe des y, la courbe CCC s'en éloigr L'abscisse maximum pour celle-ci correspond à peu près point où BBB atteint l'axe des y. La zone où l'oxyde de ca bone existe seul est beaucoup plus étendue ici que dans fourneaux au charbon de bois.

Fig. 4. A. — *Haut fourneau de Pont-l'Évêque.*



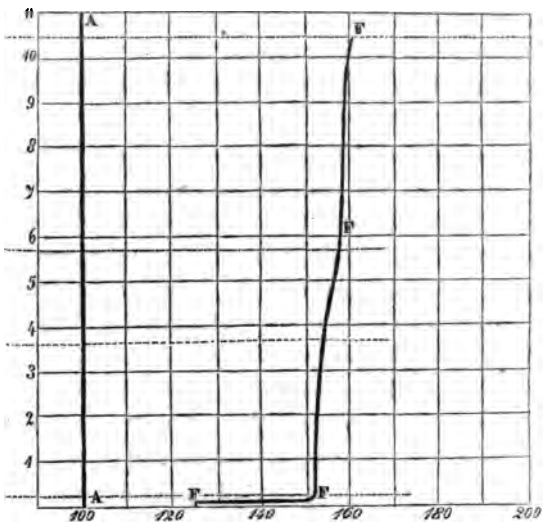
La courbe DDD représente l'hydrogène. Dans les fou neaux au coke, cette courbe est très-rapprochée de l'a des y, et se maintient à une distance à peu près constar de cet axe. Dans les fourneaux au charbon de bois, elle représentée d'abord par une ligne à peu près parallèle l'axe des y, et se rapproche de cet axe à partir du point commence l'inflexion des courbes de l'acide carbonique de l'oxyde de carbone.

(1) Il faut remarquer que l'inflexion de ces deux courbes près du gu lard serait beaucoup moins considérable si l'on n'enlevait pas une partie courant de gaz pour l'alimentation des fours comme on l'a dit p. 344.

La ligne EEE représente la vapeur d'eau.

Enfin, j'ai représenté par la ligne FFF le volume total des produits gazeux (ramené à o degré), correspondant à 100 volumes d'azote. A la tuyère ($y = 0$), ce volume est représenté par une abscisse égale à 126,26. Il augmente rapidement et devient égal à 152,52, lorsque la transformation de l'oxygène en oxyde de carbone est complète. A partir

Fig. 4. B. — *Haut fourneau de Pont-l'Évêque.*



de ce point, très-peu élevé, comme on sait, au-dessus de la tuyère, on voit que, dans tous les fourneaux, la courbe s'éloigne de l'axe des y à mesure qu'on s'élève, mais le mouvement est beaucoup plus marqué dans les fourneaux au charbon de bois que dans les fourneaux au coke. Cela se conçoit aisément, puisque l'on emploie beaucoup moins d'air dans les premiers pour obtenir la même quantité de fonte; par conséquent, l'influence du dégagement des produits gazeux du minerai sur le volume total des gaz doit être plus sensible dans ce cas que dans l'autre. On peut remarquer également que, dans certains points de la hauteur

du fourneau, l'éloignement de la courbe de l'axe des y se fait bien plus rapidement que dans d'autres, ce qui tient évidemment à ce qu'il s'opère, dans la zone correspondante, un dégagement de produits volatils comme l'acide carbonique de la castine ou la vapeur d'eau des minerais. Dans le fourneau de Pont-l'Evêque, où l'on ne charge que du minerai grillé, la courbe n'éprouve aucune inflexion brusque quand on s'approche du gueulard.

On a vu, par ce qui précède, que les différences observées dans la position des zones de réduction des fourneaux au coke et au charbon de bois tiennent à des différences de température.

Il est assez facile d'expliquer pourquoi, sur toute la hauteur de l'appareil, une tranche quelconque du fourneau au coke est toujours à une température plus élevée que la zone correspondante d'un fourneau au charbon de bois. L'échauffement des matières de la colonne descendante s'opère toujours au moyen de la chaleur sensible que conserve le courant de gaz provenant des tuyères, après la transformation de l'oxygène de l'air en oxyde de carbone. La masse de gaz qui traverse le haut fourneau est à peu près proportionnelle au combustible introduit. Plus on consommera de carbone pour fondre 1 de minerai, plus la masse des gaz sera considérable par rapport à celle du lit de fusion, et, par conséquent, plus la température de celui-ci sera élevée. Or, dans les fourneaux au charbon de bois, la consommation de combustible pour 100 de fonte varie entre 100 et 150 de charbon, qui se réduisent par calcination dans la cuve à 90 et 135 de carbone (Clerval, Audincourt). Dans les deux fourneaux au coke que j'ai étudiés, la consommation de coke était de 285 et 200 kilogrammes pour 100 kilogrammes de fonte, ou, en déduisant 15 pour 100 de cendres, de 242 et 170 de carbone. Les minerais rendent à peu près autant de fonte à Audincourt qu'à Pont-l'Evêque, à Clerval qu'à Vienne, et l'on en déduit par con-

séquent, que la masse des gaz qui traversent les fourneaux, rapportée à une même quantité de fonte obtenue, est presque deux fois plus considérable à Pont-l'Evêque qu'à Audincourt, au fourneau de Vienne qu'au fourneau de Clerval.

Ainsi, les différences observées dans la composition des gaz dans les mêmes zones des fourneaux au coke ou au charbon de bois tiennent à leur température, et celle-ci est en rapport avec la quantité de combustible consommée. On peut maintenant se demander pourquoi, dans les fourneaux au coke, la consommation en carbone réel est moyennement deux fois plus considérable que dans les hauts fourneaux au charbon de bois. L'explication de ce fait exige quelques développements.

Il paraît bien constant que le charbon de bois est susceptible, toutes choses égales d'ailleurs, de transformer l'acide carbonique en oxyde de carbone plus rapidement que le coke. Cette manière de voir est appuyée sur l'analyse des gaz des cubilots (p. 389 et 391), dans lesquels on trouve encore des proportions considérables d'acide carbonique, et sur la comparaison des analyses faites sur les gaz pris dans le voisinage de la tuyère des fourneaux d'Audincourt et de Pont-l'Evêque. La zone dans laquelle il existe de l'acide carbonique paraît toujours notablement plus étendue avec le coke qu'avec le charbon de bois. Or, il est très-important que la zone dans laquelle existe l'oxygène et l'acide carbonique ne soit pas trop étendue. En traversant cette zone, le fer carburé s'affinerait en partie et produirait des laitiers ferreux. Dans les expériences ci-dessus (15) et (16), on peut se convaincre que la quantité d'oxygène combinée dans les gaz est très-notablement inférieure à celle qui correspond à l'azote dans l'air atmosphérique, et ce résultat semble prouver qu'il y a oxydation d'une quantité sensible de fer au passage des matières en fusion devant la tuyère. On peut déduire de ce fait plusieurs considéra-

tions importantes sur l'allure des fourneaux et sur la nature des fontes produites.

Considérons le cas où il s'oxyderait du fer devant la tuyère, soit par l'oxygène de l'air, soit par la décomposition de l'acide carbonique formé.

D'après Dulong, 1 litre d'oxygène absorbé pendant la combustion du fer correspond à un dégagement de 6,216 unités de chaleur.

Les produits de cette combustion par l'air sont de l'oxyde de fer et de l'azote. La température, calculée au moyen des chaleurs spécifiques de l'azote et de l'oxyde de fer formé, serait 2,690 degrés (*Annales des Mines*, t. III, p. 192, 4e série). Bien que ce nombre soit un peu incertain, on peut néanmoins, en le rapprochant de la température due à la formation de l'acide carbonique dans l'air (2,200 degrés), tirer cette conclusion, que la température développée par la combustion du fer dans l'air est au moins égale à celle produite par la combustion, également dans l'air, du charbon passant à l'état d'acide carbonique.

Si le fer s'oxyde par la décomposition de l'acide carbonique, il faudra 2 litres de ce gaz pour fournir 1 litre d'oxygène qui, en se combinant au fer, produira 6,216 unités de chaleur. D'un autre côté, il y aura 2 litres d'oxyde de carbone formés, qui, par leur combustion, produiront 6,260 unités, lesquelles auront dû être absorbées et rendues latentes par la décomposition de l'acide carbonique. Ainsi il y aura, d'une part, absorption de 6,260 unités de chaleur; de l'autre, dégagement de 6,216 unités. On peut conclure de là qu'il n'y a pas d'absorption sensible de chaleur dans la décomposition de l'acide carbonique par le fer, et, par suite, que le mélange d'oxyde de carbone et d'azote produit dans cette réaction conservera la température due à la formation de l'acide carbonique. Si, au contraire, l'acide carbonique est changé en oxyde de carbone par le charbon, on sait qu'il en résulte une absorption considérable de cha-

leur latente et un abaissement correspondant de température. Ainsi, plus il y aura de fer oxydé devant la tuyère, plus la température de la colonne gazeuse ascendante sera élevée après le changement complet de l'acide carbonique en oxyde de carbone. Il est évident aussi que la proportion d'oxyde de carbone contenue dans les gaz sera en raison inverse de la quantité d'oxyde de fer formée, puisque l'acide carbonique décomposé par le fer ne donne qu'un volume égal au sien d'oxyde de carbone, tandis qu'il produit un volume de ce gaz double du sien quand la décomposition s'opère par le charbon.

On peut établir, par des considérations analogues à celles qui précèdent, que l'élévation de température du courant ascendant due à l'oxydation du fer devant la tuyère, doit être accompagnée d'un refroidissement correspondant dans la température du creuset. En effet, l'oxyde de fer formé se trouvant dans les scories à l'état de silicate, il y aura nécessairement réaction entre cet oxyde et le carbone de la fonte ou les fragments de charbon mêlés avec le laitier. Les analyses des gaz pris à la tympe du fourneau de Clerval (page 289), celles des gaz pris au contrevent et à la rustine du fourneau d'Audincourt (page 306), prouvent clairement que cette réaction a toujours lieu, et qu'elle produit de l'oxyde de carbone. Or, il est facile de voir que cette formation d'oxyde de carbone doit être accompagnée d'une absorption considérable de chaleur latente (1).

Pour 1 litre de vapeur de carbone (1gr,078), passant à l'état d'oxyde, il y a 1,598 unités de chaleur dégagées;

(1) L'oxydation du fer au passage devant la tuyère et la réaction du charbon sur le silicate de fer des scories, se prouvent encore par le fait suivant: Quand on coule la fonte, le laitier qui arrive sur le métal à la fin de la coulée est noir et beaucoup plus ferrugineux que le laitier sorti dans l'intervalle compris entre deux coulées. Le silicate ferreux formé devant la tuyère paraît pouvoir traverser le laitier en vertu de sa plus grande densité; puis il se réduit au contact de la fonte et par son carbone, en devenant semblable au laitier ordinaire.

mais il y a en même temps une quantité de fer réduite telle, que sa combinaison avec 1 litre d'oxygène donnerait 6,216 unités. Il y a donc nécessairement absorption de 6,216—1,598=4,618 unités de chaleur dans cette réaction.

Ainsi l'élévation de température de la colonne gazeuse ascendante, et, par suite, des matières contenues dans le fourneau au-dessus des tuyères, sera accompagnée d'un refroidissement du creuset correspondant à la quantité de fer réduite.

Ces principes me paraissent pouvoir expliquer les différences de roulement des fourneaux au coke et au charbon de bois, et les principales variations qu'on observe dans l'allure des hauts fourneaux.

On doit admettre à priori que l'oxydation devant la tuyère du fer réduit dans la partie supérieure du fourneau sera toujours, toutes choses égales d'ailleurs, d'autant plus considérable que la proportion du fer, par rapport au charbon, sera plus grande dans le lit de fusion. On conçoit, en effet, que l'oxygène de l'air et de l'acide carbonique se partageront près de la tuyère, entre le fer et le carbone, dans un rapport nécessairement variable avec les proportions respectives de ces deux corps.

Si maintenant nous comparons deux combustibles qui agissent avec une rapidité différente sur l'air et sur l'acide carbonique, comme le coke et le charbon de bois, il est bien évident qu'il faudra augmenter la masse du charbon le moins combustible par rapport à celle du minerai, afin que l'oxydation du fer ne soit pas plus considérable dans un cas que dans l'autre. Aussi l'expérience a-t-elle prouvé qu'il fallait en moyenne deux fois plus de coke que de charbon de bois pour produire, dans le haut fourneau, le même poids de la même nature de fonte.

On explique de la même manière les différences de consommation d'un même fourneau, employant toujours le même combustible, suivant qu'on veut produire des qua-

lités différentes de fonte. Ainsi l'on sait que l'on consomme beaucoup plus de charbon pour avoir des fontes grises que pour avoir des fontes blanches.

Dans le roulement normal en fonte blanche, la température des gaz au gueulard ne peut guère être plus basse que celle des gaz du haut fourneau d'Audincourt, qui marchait, comme je l'ai indiqué ; en fonte très-grise, et la différence, si elle existait, ne serait pas en rapport avec la diminution de consommation du combustible. Si la température des gaz à leur sortie d'un fourneau marchant en fonte grise est à peu près la même que dans le roulement normal en fonte blanche, il faut nécessairement en conclure que la température des gaz, après la formation de l'oxyde de carbone, était plus élevée dans ce dernier cas que dans le premier. En effet, le volume des gaz dépendant de la proportion de carbone consommée, il est évident qu'il y aura, pour un même poids de minerai, plus de gaz circulant dans le fourneau, dans le roulement en fonte grise que dans le roulement en fonte blanche. Si la température est la même dans la cuve, c'est que le courant était plus échauffé près de la tuyère dans un cas que dans l'autre, et cette circonstance ne peut s'expliquer que par la combustion devant la tuyère d'une certaine quantité de fer qui passe dans le laitier et blanchit la fonte.

Les fontes blanches se produisent assez souvent dans les hauts fourneaux qui marchent en fonte grise par l'effet d'un dérangement du fourneau. Quand ce dérangement est de longue durée, on reconnaît que *la chaleur monte au gueulard;* les gaz y arrivent avec une chaleur presque suffisante pour faire rougir les parois intérieures de la cuve. En même temps, les fontes sont blanches et les laitiers très-chargés d'oxyde de fer, en sorte que les minerais ne rendent que fort peu de métal. Cette élévation considérable dans la température de la cuve est accompagnée d'un refroidissement très-sensible dans la température du creuset. Ces circonstances fort singulières de l'allure des hauts fourneaux me parais-

sent s'expliquer de la manière la plus naturelle, en t compte des considérations présentées plus haut. Cette g élévation de température dans la cuve ne peut tenir qu' augmentation correspondante dans la quantité de ch sensible entraînée par le courant de gaz après la form de l'oxyde de carbone. Un faible rendement en fonte refroidissement du creuset en sont la conséquence ir diate.

L'expérience prouve que la fonte grise en contact des scories chargées de silicate de fer blanchit très-ra ment. On conçoit donc comment il doit se produire fonte blanche dans les dérangements dont je viens de pa Le fait est aussi d'accord avec la théorie de M. Karste la production des différentes espèces de fontes. La blanche, d'après M. Karsten, se produit à une tempér plus basse que la fonte grise. Cet abaissement de te rature, qui accompagne la formation de la fonte blan n'est-il pas dû à l'action décarburante du silicate d contenu dans les scories ?

Un dérangement de peu de durée, comme une chu minerais devant la tuyère pendant quelques heures, ne duit pas sensiblement le transport de la chaleur au g lard en raison de la masse des matières contenues da fourneau. Le seul symptôme du dérangement consiste la production des fontes blanches et des laitiers fer Mais quand on emploie les gaz des hauts fourneaux dan fours à réverbère à haute température, on s'aperçoit in diatement du moindre dérangement survenu dans l'a du fourneau par l'abaissement qui se produit dans la pérature du four. Nous avons vu effectivement que la pr tion d'oxyde de carbone contenu dans les gaz était d'a plus faible, que la quantité de fer brûlée devant la tu était plus considérable.

L'emploi d'un vent trop fort, qui augmente l'étendu la zone oxydante ou de minerais trop riches ou trop fusil

qui laissent le fer mal protégé dans leur passage devant la tuyère, sont les principales circonstances qui déterminent la formation de la fonte blanche et le transport de la chaleur au gueulard. Le meilleur moyen de corriger cette tendance consiste dans l'emploi du vent chaud.

Si j'ai beaucoup insisté sur les considérations qui précèdent, c'est que je suis convaincu que l'application des résultats des recherches de Dulong sur les chaleurs de combustion à la théorie des hauts fourneaux, permet d'expliquer, d'une manière simple et naturelle, les principales circonstances de leur roulement et les variations singulières qu'on observe dans leur allure.

Résumé.

On peut admettre que les résultats des analyses faites sur les gaz des fourneaux au coke confirment très-nettement les conclusions que j'avais tirées d'un précédent travail sur la composition des gaz des fourneaux au charbon de bois et sur la théorie des phénomènes qui s'y produisent.

On a dû remarquer que la zone de réduction du minerai, située, dans les fourneaux au charbon de bois, dans la moitié inférieure de la cuve, occupait, au contraire, dans les fourneaux au coke, la partie supérieure de l'appareil. J'ai montré que cette différence de position de la zone de réduction tenait aux différences bien constatées entre les températures des mêmes zones des deux classes de fourneaux.

On a vu que la plus grande élévation de température des fourneaux au coke était la conséquence de leur plus forte consommation en combustible. J'ai fait voir que ce dernier résultat s'expliquait par les différences de combustibilité du coke et du charbon de bois. Enfin, les mêmes considérations ont permis de montrer de quelle manière la production des diverses espèces de fonte se trouvait liée à la consommation du combustible et à la répartition de la chaleur dans le haut fourneau.

Détermination de la chaleur de combustion.

Les données que j'ai inscrites plus haut sur le roulement [illegible]nt des fourneaux de Vienne et de Pont-l'Évêque peuvent nou[illegible]ous permettre de déterminer approximativement la chaleur d[illegible] de combustion des gaz qui traversent le haut fourneau et cell[illegible]elle des gaz qui se rendent dans les fours, leur volume, etc. [illegible].

1°. Le fourneau de Vienne consomme au quintal de fonte [illegible]nte

	kil
Coke.....	285,00
Minerais et castine.....	369,42

Le lit de fusion renferme environ 115 kilogrammes d[illegible]s d[illegible] carbonate de chaux contenant :

	kil		
Acide carbonique.....	50,6	Carbone...	13,8
		Oxygène...	36,8

Le coke renfermant 15 pour 100 de cendres, il corre[illegible]res-pond à 242 kilogrammes de carbone réel, qui ont absorb[illegible]rbé, pour se changer en oxyde de carbone, 322 kilogramm[illegible]mes d'oxygène.

Or 100 kilogrammes de fonte provenant du peroxy[illegible]yde de fer correspondent à 44 kilogrammes d'oxygène, qu[illegible]ui, joints aux 36kil,8 d'oxygène provenant de la castine, dor[illegible]on-nent 80kil,8.

Cette quantité d'oxygène provenant du lit de fusion, [illegible], et qui doit se trouver dans les gaz, équivaut aux 0,251 de l'o[illegible]xy-gène qui a servi à transformer le coke en oxyde de carbo[illegible]ne.

Le gaz, pris à 1 mètre de profondeur, renferme 63[illegible],6 d'azote, qui correspondraient, dans l'air atmosphérique [illegible], à 16,70 d'oxygène; or la quantité d'oxygène combinée d[illegible]ns 100 parties de gaz est 18,69; l'oxygène en sus de celui [illegible]ui provient de l'air est donc représenté par 1,99, ou bien [illegible]ar 11,9, en représentant par 100 l'oxygène de l'air introd[illegible]uit par la tuyère.

Si l'on fait le même calcul pour les gaz pris au gueula[illegible]rd,

on trouve que l'oxygène combiné dans les gaz, en sus de celui qui correspond à l'azote, forme les 0,522 de l'oxygène provenant de l'air atmosphérique.

On peut déduire de ces données le rapport du volume du gaz soustrait à 1 mètre de profondeur au volume total. En effet, puisque 25,1 doit représenter l'oxygène du minerai correspondant à 100 d'oxygène atmosphérique, il en résulte que la quantité d'oxygène que prendraient les gaz en se rendant de 1 mètre de profondeur au gueulard, s'il n'y avait pas de soustraction, serait $25,1 - 11,9 = 13,2$.

Dans le cas qui nous occupe, la quantité d'oxygène prise par le gaz en s'élevant de 1 mètre de profondeur jusqu'au gueulard est $53,2 - 11,9 = 40,3$.

Le volume de gaz qui traverse l'espace compris entre la prise de gaz et le gueulard, est donc les $\frac{13,2}{40,3} = 32,7$ pour 100 du volume total du gaz à 1 mètre de profondeur.

2°. Nous pouvons faire un calcul analogue pour le fourneau de Pont-l'Évêque. Il consomme, pour 100 kilogrammes de fonte, 200 kilogrammes de coke équivalant à 170 kilogrammes de carbone réel, lesquels prendront $226^{kil},7$ d'oxygène pour former de l'oxyde de carbone.

100 kilogrammes de fonte correspondent à 40 kilogrammes d'oxygène seulement, à cause de l'emploi des scories de forges, et à 337 kilogrammes de minerais grillés, qui contiennent environ moitié de leur chaux à l'état caustique, d'après l'expérience que j'en ai faite.

Les 337 kilogrammes contiennent 84 kilogrammes de chaux et d'acide carbonique, formés de :

	kil		kil
Chaux.....	60		
Acide carbonique.....	24	Oxygène...	17,5
		Carbone...	6,5

L'oxygène combiné dans le gaz, en sus de l'oxygène atmosphérique, sera donc $57^{kil},5$, ou les 25,3 pour 100 de l'oxygène de l'air.

Le gaz pris à $3^m,50$ de profondeur renferme 62,7 d'azot correspondant dans l'air à $16^{kil},47$ d'oxygène. Or la quan tité d'oxygène combinée est de 18,24. La différence 1,7 représente les 10,7 pour 100 de la quantité d'oxygène co respondant à l'azote.

Au gueulard, l'oxygène correspondant à l'azote est	16,41
Celui combiné dans le gaz.....	21,34
La différence.....	4,93

représente les 30 pour 100 de l'oxygène atmosphérique.

Le rapport du volume gazeux qui sort par le gueulard volume total du gaz qui arrive à $3^m,50$ au-dessous, sera

$$\frac{25,3 - 10,7}{30 - 10,7} = \frac{14,6}{19,3} = 75,6.$$

Ce qui passe à travers la conduite en tôle pour arriver à four, est donc les 0,244 ou un quart environ du coura total.

On brûle par heure 300 kilogrammmes de coke dans l fourneau de Pont-l'Évêque. La consommation du four à mazer correspond donc par heure à 75 kilogrammes environ de coke changé en oxyde de carbone. C'est à peu près la consommation en houille d'un four à puddler.

Les calculs qu'on vient de lire permettent, comme on l'a vu, de déterminer la quantité de gaz consommée dans un four dépendant d'un haut fourneau, lorsque l'on connaît les principales données du roulement du fourneau, la composition du lit de fusion, et celle des gaz pris au gueulard et dans la conduite. Cette détermination, qui pourra se faire habituellement avec assez d'exactitude, présente quelque incertitude dans le cas particulier du fourneau de Pont-l'Évêque, en raison de l'emploi du minerai grillé. Il est très-difficile de savoir exactement la proportion de calcaire qui a été décomposée dans le grillage, parce qu'elle varie

d'un morceau à l'autre, et d'un grillage au grillage suivant.

Nous pouvons encore déduire des résultats des analyses, comparés au roulement du fourneau : 1° le volume total des gaz qui circulent dans le fourneau; 2° la quantité totale de chaleur que peut fournir la combustion du courant de gaz pris à diverses hauteurs; 3° le volume de l'air nécessaire, dans chaque cas, pour cette combustion; 4° enfin, la température maximum qui doit en résulter.

1°. Le fourneau de Vienne consomme moyennement par heure $471^{kil},4$ de coke qui équivalent à 400,70 de carbone réel,

		kil
Carbone réel consommé par minute		6,68
Poids des minerais et de la castine dans le même temps		10,18
Ces $10^{k},18$ renferment	carbonate de chaux	3,17
	carbone	0,38

La quantité de carbone contenue dans le lit de fusion est les 0,053 du carbone total $\left(\frac{38}{706}\right)$.

Or, d'après les résultats des analyses, si l'on prend le gaz à 1 mètre de profondeur, on trouve que 100 volumes d'azote correspondent à 27,2 volumes de vapeur de carbone, ou, en défalquant les 0,053 provenant du lit de fusion, à 25,8 volumes de vapeur de carbone.

100 d'azote en poids corrrespondant à 22,11 de carbone, on aura donc introduit dans le fourneau par minute $30^{kil},21$ d'azote ou $39^{kil},23$ d'air qui équivalent à $30^{m.c},17$.

Le volume des gaz secs qui traversent dans une minute la section du fourneau, prise à 1 mètre de profondeur, ramené à 0 degré et à la pression de $0^{m},760$, sera donné par la proportion :

$$79,2 : 63,59 :: x : 30^{m.c},17; \quad \text{d'où} \quad x = 37^{m.c},57.$$

D'après les calculs rapportés plus haut, les 0,327 du

volume du gaz arrivent au gueulard et les 0,673 se rendent dans le four à air chaud. On a donc, par minute,

	m.c
Volume des gaz qui se rendent dans le four à chaleur perdue.....	25,29
Volume des gaz qui s'échappent au gueulard.	12,28

Ces nombres nous permettent de déterminer la quantité de chaleur que peut produire la combustion des gaz, et le rapport de cette quantité de chaleur à la chaleur de combustion du coke brûlé dans le fourneau. Les gaz renferment ;

	A 1m de profondeur au-dessous du gueulard.	Au gueulard.
Oxyde de carbone....	31,83	25,24
Hydrogène.....	1,81	2,48
Total.....	33,64	27,72

D'où chaleur de combustion (1) :

Sur 1 litre de gaz.....	1,0529	0,8676
Sur la totalité des gaz..	26,627,8	8,198,2
Total.....	34,826	

Or 6kil,68 de carbone produiraient dans le même temps, par une combustion complète, 48,697 unités de chaleur.

D'où l'on déduit, pour le rapport de la chaleur de combustion des gaz à celle du carbone consommé, le nombre 0,715.

Si l'on tient compte de la chaleur propre des gaz à leur sortie du fourneau, le rapport de la chaleur perdue à la chaleur de combustion du coke sera plus élevé encore.

En effet, la température des gaz pris à 1 mètre de profondeur, doit être évaluée au moins à 500 degrés, puisque le verre s'y ramollit. Nous admettons 100 degrés pour la tem-

(1) La chaleur de combustion de 1 litre d'oxyde de carbone ou d'hydrogène étant représentée d'après Dulong par 3,130 unités de chaleur, et celle de 1gr de carbone par 7,290 unités.

pérature moyenne des gaz à leur sortie du haut fourneau, et 0,350 pour la chaleur spécifique correspondante à 1 litre de gaz. On trouvera ainsi que les gaz, à 1 mètre de profondeur, renferment en calorique sensible 4,425,7, et ceux qui sortent du fourneau 429,8; total : 4,855,5.

La chaleur sensible des gaz équivaut donc aux 0,10 de la chaleur de combustion du carbone introduit dans le fourneau.

Le coefficient qui représente le rapport de la chaleur perdue totale à la chaleur qui serait développée par la combustion complète du carbone, est donc 0,815.

Le nombre total des calories qui représente la chaleur perdue sera 34,826 + 4,855,5 = 39,681,5.

Si l'on admet que l'on consomme, dans les machines à vapeur, 25,000 calories par force de cheval et par heure, on trouvera que la chaleur perdue du fourneau de Vienne correspond à 95,6 chevaux-vapeur.

On peut calculer la température de combustion des gaz pris à différentes hauteurs dans le fourneau de Vienne, et former un tableau analogue à ceux que j'ai calculés pour les fourneaux d'Audincourt et de Clerval. On les trouvera plus loin (p. 445 et 446), ainsi que la manière de faire les calculs (p. 440) énoncée déjà page 249.

2°. Nous allons chercher de même à obtenir, pour le fourneau de Pont-l'Évêque, les nombres correspondant à ceux qui précèdent.

On consomme par heure 300 kilogrammes de coke équivalant

		kil
en carbone réel à		255,00
Et par minute, carbone		4,25
Poids des minerais consommés par minute		8,43
qui contiennent :	acide carbonique	0,60
	carbone	0,16

La quantité de carbone contenue dans le lit de fusion est les 0,036 du carbone total.

Nous chercherons, au moyen de ces données, quel est le

volume des gaz qui traversent la section du haut fourneau placée immédiatement au-dessous de la prise de gaz. Nous admettrons, d'après les résultats des analyses, puisque le carbone n'a pas varié, qu'à cette hauteur le minerai a conservé le reste de son acide carbonique.

A la hauteur de la prise de gaz, c'est-à-dire à $3^{m},65$ gueulard, les analyses montrent que 100 volumes d'azote correspondent à 28,5 de vapeur de carbone, ou, en retranchant les 0,036, à 27,5 de vapeur de carbone provenant du coke.

100 d'azote en poids correspondent à 23,4 de carbone.

On consomme par minute $4^{kil},25$ de carbone réel; on introduit donc dans le fourneau $18^{kil},16$ d'azote qui correspondent à $23^{kil},58$ d'air, ou $18^{m.c},14$.

Le volume des gaz, ramené à 0 degré et à $0^{m},760$, sera donc, à la profondeur de la prise des gaz, donné par la proportion

$$79,2 : 62,72 :: x : 18^{m.c},14, \quad x = 22^{m.c},90.$$

D'après le calcul présenté plus haut, il passe dans la conduite qui se rend au four à gaz, les 0,244 du courant total, et par minute $5^{m.c},59$.

Le volume qui se rend au gueulard sera donné par la différence $17^{m.c},31$.

La chaleur de combustion sera déterminée comme il suit :

		A $3^{m},65$ de profondeur au-dessous du gueulard.	Au niveau du gueulard.
Les gaz contiennent sur 1 litre :	oxyde de carbone. . .	35,12	28,37
	hydrogène.	1,48	2,01
		36,60	30,38
Chaleur de combustion :	sur 1 litre.	1,1456	0,9509
		($5^{m.c},59$)	($17^{m.c},31$)
	sur la totalité.	6,403,9	16,460
Chaleur de combustion totale.		22,863,9 calories.	

Or 4^{kil},25 de carbone auraient produit 30,982,5 calories.

Le rapport de la chaleur de combustion des gaz à celle du carbone est 0,738.

Pour tenir compte de la chaleur propre du gaz qui forme une fraction notable de la chaleur perdue, il faut se rappeler que l'étain fondait toujours au gueulard, et que l'antimoine n'y fondait jamais. Nous admettrons 300 degrés pour la température moyenne du courant; à la prise de gaz, la température doit être évaluée au moins à 600 degrés.

En partant de ces données et de la chaleur spécifique des gaz, on trouvera :

Chaleur sensible des gaz au gueulard	1,869,5
Idem à la prise de gaz.....	1,173,9
Total.....	3,043,4

Ce nombre équivaut aux 0,098 de la chaleur de combustion du carbone consommé.

Le coefficient qui représente la chaleur perdue des gaz dans le haut fourneau de Pont-l'Évêque sera donc 0,836, la chaleur de combustion du carbone brûlé étant prise pour unité.

La chaleur perdue totale, y compris celle employée dans le four à mazer et celle des gaz au gueulard, est donc représentée, par minute, par 25,907,3 calories, qui correspondent à 62,2 chevaux-vapeur.

Les tableaux suivants renferment les résultats des calculs que je viens de faire sur les fourneaux de Vienne et de Pont-l'Évêque; ils présentent d'une manière synoptique pour trois hauteurs différentes : 1° le volume du gaz débité par minute, 2° le volume d'air nécessaire à la combustion du litre de gaz, 3° la chaleur de combustion, 4° la chaleur sensible pour un litre de gaz, et 5° enfin, la température de combustion des gaz pris à ces trois hauteurs. La dernière colonne horizontale contient les nombres fournis par le gaz qui contiendrait 34,43 d'oxyde de carbone et 65,57 d'azote.

	VOLUME du gaz par minute.	nécessaire à la combustion sur 1 litre de gaz.	de combustion. Sur 1 litre de gaz.	de combustion. Sur la totalité.	sensible sur 1 litre. L'air et les gaz étant supposés à 300 degrés. Gaz.	sensible sur 1 litre. L'air et les gaz étant supposés à 300 degrés. Air.	de combustion. Air et gaz à 0 degrés.	de combustion. Air et gaz à 300 degrés.
		litres.	calories.	calories.	calories.	calories.	degrés cent.	degrés cent.
Gaz pris au gueulard.....	12,28	0,666	0,8676	8,1982	0,108	0,069	1515	1824
Gaz à 1 mètre de profondeur..	37,57	0,808	1,0529	3,9557	0,106	0,084	1751	2070
Gaz à $4^{m},20$ de profondeur...	36,90	0,840	1,0945	4,0387	0,106	0,087	1780	2092
Gaz calculé. { Oxyde de carbone. 34,43 / Azote..... 65,57 }	36,28	0,827	1,0770	3,9078	0,105	0,086	1807	2110

Haut fourneau de Pont-l'Évêque.

	VOLUME du gaz par minute	AIR nécessaire à la combustion sur 1 litre.	CHALEUR de combustion.		CHALEUR sensible de 1 litre de gaz et d'air comburant chauffés à 300 degrés.		TEMPÉRATURE de combustion.	
			Sur 1 litre.	Sur la totalité des gaz.	Gaz	Air.	Air et gaz à 0 degrés.	Air et gaz à 300 degrés.
	m.c	litres.	calories.	calories.	calories	calories.	degrés cent.	degrés cent.
Gaz pris au gueulard.....	17,31	0,730	0,9509	16460	0,108	0,075	1621	1925
A 3^m,65 de profondeur (prise de gaz).....	22,90	0,880	1,1456	26234	0,106	0,091	1827	2130
A 7^m,15 de profondeur (grand ventre).....	22,28	0,850	1,1068	24659	0,106	0,088	1790	2092
Calculé.....	21,91	0,827	1,077	23597	0,105	0,086	1807	2110

D'après les résultats numériques qui précèdent, on voit que la chaleur perdue des gaz s'élève en moyenne, pour les hauts fourneaux de Vienne et de Pont-l'Évêque, aux 0,8 de la chaleur de combustion du carbone employé. La chaleur sensible des gaz entre dans ce coefficient pour la fraction 0,097, c'est-à-dire pour un peu moins des 0,125.

Le coefficient qui représente la fraction de la chaleur perdue est très-notablement plus grand que celui des fourneaux au charbon de bois, lequel a été de 0,622 à Clerval et de 0,670 à Audincourt. Il est vrai que je n'ai pas tenu compte, dans le cas de ces deux derniers fourneaux, de la chaleur sensible que conserve le courant du gaz à sa sortie du gueulard. Mais cette quantité de chaleur, qui est une fraction notable de la chaleur perdue dans les fourneaux au coke, se trouve presque nulle dans les fourneaux au charbon de bois, où, comme on l'a vu, la température des gaz, à leur sortie du fourneau, est très-peu supérieure à la température de l'air extérieur.

Le succès des essais de M. Frèrejean, relatés plus loin (p. 458), et la composition des gaz des hauts fourneaux au coke, comparée à celle des gaz des hauts fourneaux au charbon de bois, prouvent qu'on arrivera à utiliser avec beaucoup d'avantage les gaz de ces hauts fourneaux, soit pour le finage ou le puddlage de la fonte, soit pour le corroyage du fer. Un fourneau au coke de grandes dimensions qui produirait 10 à 15,000 kilogrammes de fonte par jour, trois ou quatre fois plus que le haut fourneau de Pont-l'Évêque dans ses conditions actuelles de roulement, pourra certainement alimenter plusieurs fours à réverbère. Il est bien probable qu'on pourra, sans nuire au roulement du fourneau, en extraire, vers le milieu de la hauteur de la cuve, le tiers ou la moitié des gaz de la colonne ascendante, puisque le fourneau au-dessus de la prise des gaz se trouverait alors, comme on l'a vu plus haut, dans des conditions semblables à celles des fourneaux

au charbon de bois. Les gaz qui sortiront du gueulard pourront encore être utilisés pour le chauffage de l'air ou d'une chaudière à vapeur; si, au contraire, on prenait la totalité des gaz près du gueulard, ils seraient, à la vérité, moins riches en combustibles que ceux extraits vers le milieu de la cuve, mais ils seraient encore cependant plus propres à développer de hautes températures que les gaz des hauts fourneaux au charbon de bois, surtout dans les usines au coke où l'on ne consomme que des minerais déshydratés par le grillage. Tout semble annoncer que les difficultés qu'on a rencontrées dans l'emploi des gaz des fourneaux au charbon de bois, lorsqu'il a fallu produire des températures très-élevées, seront beaucoup plus faciles à surmonter avec les gaz des fourneaux au coke, en raison de la composition de ces derniers et de la masse de combustible gazeux dont on peut disposer pour l'alimentation des fours. Il est seulement à désirer qu'on trouve un moyen exact et commode de déterminer à chaque instant le volume des gaz qui se rendent au four à réverbère. Ces gaz arrivent dans le four sous une certaine pression qu'on peut mesurer à l'aide d'un manomètre. La détermination de leur vitesse dans la conduite par des instruments analogues aux anémomètres, sera sans doute un des meilleurs moyens d'en connaître le volume consommé.

Analyse des gaz qui se produisent dans les cubilots.

Je place à la suite de mes expériences sur les gaz des hauts fourneaux quelques analyses de gaz du Vilkinson de Clerval et de Vienne. On sait que ces appareils sont des fourneaux à cuve cylindrique, destinés à refondre la fonte pour les moulages; on charge, par la partie supérieure, du coke et de la fonte, et on injecte l'air à la base du cubilot, par une buse très-large qui communique avec la caisse d'un ventilateur; on ne charge dans cet appareil que des matières

non oxydées, et par conséquent l'oxygène contenu dans le gaz provient en totalité de l'air injecté. Il doit y avoir une certaine analogie entre les gaz sortant d'un cubilot et ceux qui se produisent dans l'ouvrage des hauts fourneaux à coke; ces gaz brûlent avec flamme au contact de l'air.

1°. *Analyse des gaz du cubilot de Clerval.*

La hauteur totale du cubilot est de $1^m,67$; son diamètre de $0^m,50$; la première tuyère est à $0^m,33$ du fond; on peut fondre par jour dans cet appareil, 5,000 à 6,000 kilogrammes de fonte. La charge se compose de 60 kilogrammes de fonte et 19 kilogrammes de coke. Il faut, pour avoir la consommation totale en coke, ajouter à celui qu'on emploie dans le cours du roulement, 250 kilogrammes qui sont nécessaires pour le remplissage de chaque jour; le déchet sur la fonte est en moyenne de 5 pour 100.

Expériences N°s 1 à 3.

Dans les trois expériences qui suivent, le gaz a été extrait à l'aide de la bouteille d'aspiration à couche d'huile; le tube de verre plongeait dans l'extrémité d'un canon de fusil recourbé à angle droit, et dont une des branches était engagée de $0^m,10$ dans le cubilot.

		(1)	(2)	(3)
Gaz pour l'analyse		$1^{lit},350$	$1^{lit},445$	$1^{lit},022$
Baromètre		$0^m,734$	$0^m,732$	$0^m,732$
Thermomètre		22°	21°	22°
Gaz ramené à 0° et à $0^m,760$		$1^{lit},207$	$1^{lit},292$	$0^{lit},909$
Acide carbonique		gr 0,265	gr 0,305	gr 0,218
Produits de la combustion.	Eau	0,008	0,010	0,007
	Acide carboniq.	0,362	0,305	0,314

L'analyse (2) se rapporte au même gaz que celle (3); il est resté trois heures de plus dans la bouteille d'aspiration.

Ces nombres donnent :

	(1)	(2)	(3)
Acide carbonique.....	11,08	11,91	12,11
Oxyde de carbone.....	15,14	11,91	11,98
Hydrogène	0,82	0,99	0,95
Azote.....	72,96	75,19	74,96
	100,00	100,00	100,00

Le gaz auquel se rapportent les deux dernières analyses avait été pris dans un moment où l'on forçait la marche du ventilateur, ce qui produisait une descente très-rapide des charges. Quand le cubilot marche aussi vite, il y a moindre consommation de coke, mais le déchet sur la fonte augmente; les gaz doivent donc renfermer, dans ce cas, une moindre quantité d'oxygène combiné pour qu'une partie passe à l'état de combinaison dans les scories. On peut vérifier cette conjecture; en effet, pour 100 volumes d'azote, la proportion d'oxygène contenue dans l'air est de 26,26; celle qui correspond à 100 d'azote dans les gaz du cubilot est la suivante :

(1)	(2)	(3)
25,54	23,76	24,13

On voit aussi que, dans tous les cas, il reste dans les gaz du cubilot une proportion considérable d'acide carbonique.

2°. *Analyse des gaz du cubilot de Vienne.*

J'ai répété ces expériences sur un cubilot de la fonderie dépendante du haut fourneau de Vienne. Voici les principales dimensions de ce cubilot :

	m
Diamètre au gueulard	0,64
Largeur entre les deux tuyères.....	0,70
Distance du fond du creuset à la 1re tuyère.....	0,80
Distance du fond du creuset à la 2e tuyère.....	1,14
Hauteur totale du cubilot.....	3,10

Il y a donc $2^m,30$ entre le niveau des tuyères et le gueu-

lard. Il y a deux buses opposées l'une à l'autre, dont ch cune a $0^m,04$ de diamètre. La pression du vent est la mêm que celle du haut fourneau.

On produit environ 1,000 kilogrammes de fonte moul par heure de roulement, et l'on consomme 18 à 20 parti de coke pour 100 de fonte. Le déchet sur la fonte employ est de 0,08 à 0,09.

On ajoute une petite quantité de castine, environ 0,02 à 0,03 du poids de la fonte.

Les gaz du cubilot s'enflamment spontanément à l' ai libre.

Expériences N°s 4 à 6.

Gaz pris au gueulard. — Les gaz ont été aspirés, à leur sortie du cubilot, à l'aide d'un canon de fusil, muni à l' intérieur d'un tube de porcelaine, et plongeant dans le gueulard de $0^m,15$ environ. Le canon de fusil communiquait avec un aspirateur à couche d'huile à l'aide d'un tube de caoutchouc et d'un tuyau de plomb. J'ai fait trois analyses de ces gaz en partant des données suivantes :

		(4)	(5)	(6)
Gaz pour l'analyse		$1^{lit},400$	$1^{lit},505$	$1^{lit},535$
Baromètre		$0^m,756$	$0^m,757$	$0^m,7575$
Thermomètre		15°,5	17°	18°,5
Gaz ramené à 0° et à $0^m,760$		$1^{lit},318$	$1^{lit},411$	$1^{lit},432$
		gr	gr	gr
Acide carbonique		0,372	0,259	0,324
Produits de la combustion.	Eau	0,004	0,013	0,011
	Acide carbonique	0,254	0,498	0,423
	Oxygène absorbé	0,092	0,183	»

Elles conduisent aux nombres qui suivent :

	(4)	(5)	(6)
Acide carbonique	14,25	9,27	11,42
Oxyde de carbone	9,73	17,82	14,92
Hydrogène	0,38	1,15	0,96
Azote	75,64	71,76	72,70
	100,00	100,00	100,00

On a trouvé que le volume de l'oxygène correspondant à 100 volumes d'azote, s'élevait à :

(4)	(5)	(6)
25,2	25,3	25,9

Si l'on rapproche de ces résultats ceux des deux analyses (1) et (2) exécutées sur les gaz du cubilot de Clerval, on voit que la composition des gaz des cubilots présente, d'une expérience à l'autre, d'assez grandes variations, mais il est assez facile d'en montrer la cause. On peut remarquer, dans les résultats des analyses, que l'acide carbonique diminue quand l'oxyde de carbone augmente, et réciproquement, sans que la proportion d'oxygène combinée dans le gaz, et rapportée à un volume constant d'azote, éprouve de variations notables. On voit que l'acide carbonique, premier produit de la combustion, ne se change ici que partiellement en oxyde de carbone. Dans l'analyse (4), c'est à peine si le quart de l'acide carbonique a éprouvé cette transformation. Dans l'analyse (5), qui correspond à la plus grande proportion d'oxyde de carbone, il n'y a pas tout à fait la moitié de l'acide carbonique changée en oxyde de carbone. On concevra facilement comment il peut se faire qu'à la sortie du cubilot le mélange des deux oxydes gazeux du carbone ait lieu dans une proportion relative variable entre certaines limites.

En comparant la composition des gaz des cubilots à celle des gaz pris dans la région inférieure des hauts fourneaux, on arrive à des résultats théoriques assez importants. Dans le cubilot, on voit que l'oxygène de l'air, après avoir traversé une hauteur de $2^m,30$ de coke et de fonte, est bien loin d'être saturé de carbone. Dans les hauts fourneaux au coke, la transformation de l'oxygène de l'air en oxyde de carbone est complète dans l'ouvrage à $0^m,40$ ou $0^m,50$ au plus de la tuyère. Cette différence me paraît devoir être attribuée à ce que la température du combustible, dans le haut fourneau, est beaucoup plus élevée que dans le cubi-

lot. Dans ce dernier fourneau, les charges descendent rapidement, la fonte absorbe, pour s'échauffer et se fondre, une grande quantité de chaleur, et on conçoit que le coke ne soit pas encore arrivé, à peu de distance de la tuyère, au degré de température nécessaire pour la production de l'oxyde de carbone, et qu'il ne puisse se former qu'une quantité peu considérable de ce gaz.

Le maximum d'effet utile du combustible, dans le cubilot, correspondrait évidemment à la transformation de l'oxygène de l'air en acide carbonique seulement. On éviterait ainsi la perte de combustible et l'absorption de chaleur latente qui résultent de la formation de l'oxyde de carbone. On ne parvient jamais, à ce qu'il paraît, à ce résultat limite puisque les gaz des cubilots sont toujours inflammables à l'air libre; mais il y a des moments, comme celui correspondant à l'analyse (4), où la proportion d'oxyde de carbone formé est très-peu considérable.

On emploie également le charbon de bois dans les cubilots pour refondre la fonte, mais on a toujours trouvé une consommation beaucoup plus considérable que dans l'emploi du coke. Ainsi, d'après M. Karsten (1), on consomme, dans diverses usines d'Allemagne, 60 à 80 kilogrammes de charbon de pin sylvestre pour refondre 100 de fonte. Ce résultat est bien remarquable, si on le compare à ce qui se passe dans le haut fourneau. Ici il faut deux fois plus de coke que de charbon de bois pour obtenir la même quantité de fonte, tandis que c'est tout le contraire dans le cubilot. Mais ce résultat, tout singulier qu'il paraisse au premier abord, s'explique naturellement par les notions que nous avons sur la combustibilité relative des différentes espèces de charbon. Le coke transformant moins rapidement l'acide carbonique en oxyde de carbone que le charbon de bois, il

(1) *Manuel de la métallurgie du fer*, t. II, p. 318; traduction par M. Culmann.

est bien clair que les gaz des cubilots au charbon de bois contiendront beaucoup plus d'oxyde de carbone que les gaz des cubilots au coke. Avec le charbon de bois, la température sera moins élevée sur toute la hauteur du cubilot, et la proportion de chaleur entraînée par les gaz à l'état latent sera beaucoup plus considérable. Dans le haut fourneau, au contraire, l'avantage est tout en faveur du charbon de bois, et l'on a vu plus haut (p. 369), quelle en était la raison. Le combustible le plus avantageux dans le haut fourneau est celui qui transforme, dans le moindre espace, l'acide carbonique en oxyde de carbone, et c'est la propriété opposée qui convient pour les cubilots.

L'emploi du coke dans les fourneaux de laboratoire, comme les fourneaux à vent ou à soufflets, présente aussi un avantage marqué sur le charbon de bois, sous le rapport de la température qu'on peut obtenir dans les creusets placés dans ces fourneaux. J'ai développé dans un précédent Mémoire (p. 324) les causes auxquelles il me paraît qu'on doit attribuer cette différence d'action des deux combustibles.

La porosité du charbon de bois me paraît être la cause principale de l'action rapide qu'il exerce sur l'air et l'acide carbonique. D'après M. Mitscherlich (1), le diamètre moyen des cellules du charbon de bois est de $\frac{1}{2400}$ de pouce. En comparant le poids du charbon sec au poids du même charbon imbibé d'eau et au diamètre des cellules, M. Mitscherlich a calculé que la surface totale des cellules, dans un morceau de charbon de bois qui pesait $0^{gr},9565$, était d'environ 73 pieds carrés. Comme les gaz peuvent pénétrer dans ces cellules, on voit que le charbon de bois présente ainsi une surface très-considérable sous un faible volume. Le coke est bien loin de présenter une porosité pareille à celle du charbon de bois, et par conséquent une surface aussi considérable sous le même volume. Son action condensante

(1) *Annales des Mines*, tome III, page 395, 4e série.

sur les gaz est aussi beaucoup moins marquée que celle du charbon de bois. Si le charbon de bois une fois allumé continue à brûler à l'air libre, c'est que la perte de chaleur qu'il éprouve par le rayonnement, dans un temps donné, est plus faible que la quantité de chaleur dégagée par la combustion. La perte de chaleur par le rayonnement ne dépend que de la surface extérieure du charbon, tandis que la chaleur dégagée par la combustion dépend de la surface exposée au contact de l'air, qui comprend à la fois la surface extérieure et une partie de la surface des pores du charbon. Si le coke une fois allumé s'éteint très-facilement à l'air libre, on doit l'attribuer à son peu de porosité. On peut ainsi rendre compte des différences de combustibilité des diverses variétés de charbon, sans qu'il soit nécessaire d'admettre de différence dans leur affinité chimique pour l'oxygène.

Pour évaluer la chaleur latente de combustion des gaz qui s'échappent du cubilot, prenons la moyenne des trois expériences rapportées plus haut, on aura, si l'on calcule comme nous l'avons déjà fait pour les gaz des fourneaux de Vienne et de Pont-l'Évêque :

		Vapeur de carbone.
Acide carbonique.....	11,65	5,825
Oxyde de carbone.....	14,16	7,080
		12,905
Hydrogène.....	0,83	
Azote.....	73,36	
	100,00	

1 litre de ce gaz correspond à 0^{lit},12905 de vapeur de carbone, qui donneraient par une combustion complète 1,014 calories.

Or 0^{lit},1499 d'oxyde de carbone et d'hydrogène donneraient 469 calories par leur combustion.

La chaleur latente de combustion des gaz représentera donc les 0,46 de celle du combustible.

Quant à la chaleur sensible des gaz à leur sortie du cubi-
ot, il est assez difficile de l'évaluer, mais elle est peu consi-
érable; car c'est à peine si l'on voit rougir faiblement les
arois intérieures du cubilot à $0^m,20$ ou $0^m,30$ de pro-
ondeur. L'antimoine fond dans le courant de gaz. Si l'on
value sa température à 600 degrés, on trouve que la cha-
ur sensible de 1 litre de gaz représente 196 unités ou les
,18 de la chaleur de combustion du carbone consommé.
a chaleur perdue totale représenterait donc les 0,64 de la
aleur du combustible employé.

On a essayé, à l'usine de Bourguignon (Doubs), d'em-
loyer les gaz d'un cubilot au coke pour refondre la fonte
u four à réverbère, en les brûlant par un courant d'air
haud projeté à la fois par plusieurs orifices, comme cela
e pratique maintenant pour la combustion des gaz des
auts fourneaux. Cet essai n'a pas réussi, et on s'en rend
ien raison par la faible teneur en gaz combustibles et l'ir-
égularité de composition des gaz employés.

VII.

Nouvelles recherches sur la composition des gaz des hauts fourneaux et sur la théorie de ces appareils. (Quatrième Mémoire.)

Plusieurs chimistes se sont occupés, dans le cours des dernières années, de la détermination de la composition des gaz des hauts fourneaux à fondre les minerais de fer. La solution de cette question présentait une grande utilité au double point de vue de la théorie et de la pratique. Les emplois nombreux et importants des gaz des hauts fourneaux rendaient nécessaire la détermination exacte de leur pouvoir calorifique, élément qui pouvait se déduire avec facilité

de leur composition chimique; et, d'un autre côté, en co parant les unes aux autres les analyses des gaz d'un mê fourneau pris à diverses hauteurs dans l'appareil, on vait pouvoir en tirer des conclusions d'une certaine nett pour l'appréciation exacte des réactions chimiques qui produisent.

M. Bunsen est le premier chimiste qui ait traité ce question. Il a recueilli les gaz du fourneau de Veckerha dans sept points différents compris entre $0^m,914$ et $4^m,57$ au-dessous du gueulard. Le haut fourneau n'avait que $6^m,4$ de hauteur (1).

Je vais rappeler succinctement les méthodes suivies pa

(1) Le Mémoire de M. Bunsen a été traduit par M. Regnault, et inséré dans les *Annales des Mines*, 3e série, t. XVI, p. 203 (1839). Les résultats des analyses ont été depuis notablement corrigés par l'auteur. Ceux qui sont discutés plus bas sont ceux que M. Bunsen a définitivement adoptés. Voici les nombres qui représentent les gaz combustibles avant et après correction.

NUMÉROS des ANALYSES.	(1)		(2)		(3)		(4)	
	a.	*b.*	*a.*	*b.*	*a.*	*b.*	*a.*	*b.*
Oxyde de carbone.	25,81	24,20	26,70	22,24	29,75	25,77	32,23	30,08
Hydrogène.....	0,25	1,33	0,65	1,27	1,80	0,58	0,68	1,77
Gaz des marais...	1,79	3,36	1,40	3,10	0,50	4,04	0,66	2,24

NUMÉROS des ANALYSES.	(5)		(6)		(7)	
	a.	*b.*	*a.*	*b.*	*a.*	*b.*
Oxyde de carbone.	33,06	29,27	29,99	26,99	30,63	26,51
Hydrogène.....	0,00	2,17	0,00	0,15	0,00	1,06
Gaz des marais...	1,04	1,07	2,50	3,84	0,31	1,88

I. Bunsen, tant pour recueillir les gaz que pour les ana-
ser.

Un long tube de fer, formé par des canons de fusil soudés
s uns aux autres, était enfoncé dans le haut fourneau jus-
'à une profondeur déterminée. Un tuyau de plomb, soudé
l'extrémité supérieure du tube de fer, était suivi d'un tube
chlorure de calcium et d'une série d'ampoules en verre
irées aux extrémités. Les gaz traversaient ordinairement
appareil avec un excès de pression, mais, pour plus de
ireté, on les a aspirés avec une machine pneumatique. Les
npoules étaient ensuite fermées au chalumeau pour n'être
ivertes qu'au moment de l'analyse.

Les analyses ont été faites dans un eudiomètre gradué
ar M. Bunsen, et qui permettait d'apprécier 0,001 du vo-
ıme du gaz. L'acide carbonique était absorbé d'abord par
a potasse, puis on introduisait de l'oxygène pur dans l'eu-
iomètre et l'on faisait détoner. L'acide carbonique produit
ans cette combustion était absorbé par la potasse, sans
enir compte de l'humidité des gaz; il ne restait plus alors
lans l'eudiomètre que l'azote et l'excès d'oxygène. Ce der-
ıier était absorbé au moyen d'un globule de phosphore qui
aissait l'azote. M. Bunsen a tenu compte de la tension de
'apeur de l'acide phosphoreux produit, et il a admis *qu'elle
ugmentait le volume du gaz restant de* $\frac{1}{40}$. Avec les données
fournies par l'expérience, on a tout ce qu'il faut pour dé-
terminer par le calcul les proportions relatives de trois gaz
combustibles. Si l'on admet que les gaz combustibles exis-
tants soient de l'hydrogène, de l'hydrogène protocarboné et
de l'oxyde de carbone, et que l'on appelle

a la contraction de volume par suite de la détonation,

b l'acide carbonique produit,

c l'oxygène absorbé;

Soient aussi x, y, z les volumes d'oxyde de carbone, d'hy-
drogène et de gaz des marais qui entrent dans le mélange,
on aura, pour déterminer les trois inconnues, les trois équa-

tions suivantes :

$$\tfrac{1}{2}x + \tfrac{3}{2}y + 2z = a,$$
$$x + z = b,$$
$$\tfrac{1}{2}x + \tfrac{1}{2}y + 2z = c;$$

d'où l'on tire :

$$x = \frac{4b + a - 3c}{3},$$
$$y = a - c,$$
$$z = \frac{3c - a - b}{3}.$$

Voici, en suivant cette méthode, qui sera discutée plus tard, les résultats obtenus par M. Bunsen :

PROFONDEUR au-dessous du gueulard.	(1) A 0m,914.	(2) A 1m,346.	(3) A 1m,828.	(4) A 2m,285.	(5) A 2m,743.	(6) A 3m,657.	(7) A 4m,570.
Acide carbonique.	8,77	11,12	3,32	3,44	3,60	7,57	5,97
Oxyde de carbone.	24,20	22,24	25,77	30,08	29,27	26,99	26,51
Gaz des marais...	3,36	3,10	4,04	2,24	1,07	3,84	1,88
Hydrogène.....	1,33	1,27	0,58	1,77	2,17	0,15	1,06
Azote	62,34	62,25	66,29	62,47	63,89	61,45	64,58
Totaux.....	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Oxygène combiné (1) rapporté à 100 vol. azote...	33,4	37,3	24,4	29,6	28,5	34,2	29,8
Vapeur de carbone pour 100 volumes d'azote...	29,1	29,3	25,0	28,6	26,6	32,9	26,6

(1) L'oxygène qui correspond à 100 volumes d'azote dans l'air atmosphérique est représenté par 26,26.

M. Bunsen déduit de son travail les conclusions suivantes:

« L'acide carbonique, qui se trouve d'abord en quantité » assez notable dans la partie supérieure du fourneau, di- » minue rapidement quand on descend, et il reste ensuite » sensiblement constant : il augmente seulement un peu en » descendant. Cette plus forte proportion d'acide carbo- » nique tient évidemment à un dégagement de ce gaz qui a » lieu dans cette partie du fourneau, dégagement produit » par le lit de fusion, et qui est facilité probablement par » la grande quantité de vapeur d'eau qui se dégage égale- » ment dans ces régions (1). Mais ce qui est surtout très- » remarquable et en opposition avec ce que l'on avait cru » jusqu'ici, c'est la constance presque absolue de la quan- » tité d'oxyde de carbone que l'on rencontre depuis le ni- » veau des charges jusqu'à une profondeur de $4^m,267$, et » qui très-probablement continue encore à avoir lieu à de » plus grandes profondeurs. »

M. Bunsen montre ensuite que le charbon décompose l'eau en produisant de l'acide carbonique, de l'oxyde de carbone et de l'hydrogène sans hydrogène carboné, et il ajoute :

« Les observations précédentes nous montrent très-clai- » rement les fonctions que remplissent les différentes par- » ties de la cuve du haut fourneau ; on peut la diviser en » trois étages : dans le premier, la réduction se prépare; » dans le second, elle s'exécute; dans le troisième, elle » s'achève.

» L'étage supérieur est caractérisé par un dégagement » très-abondant de vapeur d'eau; il descend jusqu'à une » profondeur de $1^m,22$ au-dessous du niveau des charges : » il fait l'effet d'un fourneau de grillage. L'eau hygromé- » trique ou combinée du lit de fusion et du combustible

(1) On voit que M. Bunsen n'attribue pas à la réduction de l'oxyde de fer par l'oxyde de carbone l'augmentation qu'il constate dans l'acide carbonique au gueulard.

» s'échappe dans cette partie du fourneau. Les minerais
» gileux sont calcinés et s'agglomèrent sous forme de mas
» poreuses, et l'acide carbonique se dégage facilement à
» faveur de la grande quantité de vapeur d'eau.

» Le second étage est caractérisé par la grande quanti
» d'oxyde de carbone qui s'y trouve, et qui s'élève à plus
» 30 pour 100 (1); il s'étend jusqu'à la partie inférieure d
» étalages . on peut l'appeler étage réducteur. L'oxyde
» carbone, l'hydrogène carboné et l'hydrogène pénètre
» dans les vides de la masse poreuse qui a été préparée da
» l'étage supérieur. Le minerai de fer commence par êt
» ramené à l'état d'oxyde magnétique, puis il se rédu
» complétement dans les parties inférieures ; la tempéra
» ture n'est pas encore assez élevée pour produire la fusio
» des silicates calcaires.

» Le troisième étage, l'étage inférieur, comprend l'ou
» vrage; il fait l'office d'un fourneau de fusion. Le laitie
» commence à se former; le fer réduit se carbure, et il
» forme des silicates terreux. »

Les conclusions qui précèdent n'avaient pas, comme o voit, beaucoup de netteté ni de nouveauté. De plus, il e facile de montrer qu'elles sont complétement en désaccor avec les résultats des analyses.

Pour pouvoir suivre, en effet, avec quelque précision les modifications que la colonne gazeuse ascendante d'u haut fourneau éprouve dans sa composition, et pour pou voir en déduire les réactions chimiques qui les produisen en remontant de l'effet à la cause, il est nécessaire de ra porter les divers éléments contenus dans le gaz à une pr portion fixe d'un de ces éléments. Or, il en est un, l'azot qui ne se trouve renfermé en quantité notable ni dans minerai, ni dans le combustible employé, ni dans les pr duits fixes de l'opération métallurgique, et qui pourra

(1) *Voyez* la note de la page 396.

forme la majeure partie des produits gazeux. On peut admettre, à priori, que tout l'azote de l'air introduit par la tuyère du haut fourneau se retrouvera dans les gaz en même proportion absolue à toutes les hauteurs. En rapportant tous les éléments du gaz à une quantité d'azote constante, 100 par exemple, on pourra donc suivre les modifications qu'éprouve sa composition à mesure qu'il s'élève dans le fourneau. J'ai calculé, pour chacune des analyses de M. Bunsen, les volumes d'oxygène et de vapeur de carbone combinés dans le gaz et rapportés à 100 volumes d'azote. Les nombres obtenus nous permettront d'examiner ses conclusions.

« L'étage supérieur, dit M. Bunsen, descend à une pro-
» fondeur de $1^m,22$; l'eau hygrométrique et combinée
» se dégage; les minerais se calcinent et s'agglomèrent, et
» l'acide carbonique s'échappe facilement à la faveur de
» la grande quantité de vapeur d'eau. »

Si les choses se passent ainsi que l'annonce M. Bunsen, on doit retrouver dans les gaz, au gueulard, plus d'acide carbonique, et partant plus d'oxygène et de carbone qu'à la profondeur de $1^m,346$. Or les analyses donnent, à $0^m,3048$ du gueulard, 33,4 d'oxygène et 29,1 de vapeur de carbone pour 100 d'azote, et à $1^m,346$, 37,3 d'oxygène et 29,3 de carbone, ce qui est tout le contraire de ce qui aurait dû arriver, d'après l'assertion de M. Bunsen.

L'étage moyen, dit M. Bunsen, est l'étage réducteur. Si cela est ainsi, la proportion d'oxygène combiné dans le gaz doit aller en augmentant à mesure que les gaz s'élèvent dans le fourneau, puisqu'ils réduisent le minerai de fer. Les variations devraient suivre une progression à peu près continue et dans le même sens. Or il n'en est pas ainsi; on remarque avec étonnement que les gaz pris à $1^m,828$ de profondeur (3) renferment moins d'oxygène combiné qu'il n'y en a dans l'air atmosphérique; la proportion d'oxygène combiné est plus forte à $3^m,657$ et à $4^m,570$ qu'à $2^m,285$ de profon-

deur, résultat inconciliable avec le rôle que M. Bunsen attribue à cette région du fourneau.

On voit donc que les conclusions de l'auteur ne sont pa justifiées par les résultats des expériences, et qu'il est à pe près impossible d'en tirer quelque parti au point de vue de l théorie des hauts fourneaux.

Les expériences qui suivent le travail de M. Bunsen son celles que j'ai faites en 1841 (1) sur les hauts fourneaux d Clerval et d'Audincourt marchant au charbon de bois (p. 258) et, en 1843, sur les fourneaux au coke de Vienne et de Pont l'Évêque (p. 336). La méthode que j'ai suivie pour analyser le gaz était tout à fait différente de celle de M. Bunsen. Pou obtenir les gaz du fourneau, je faisais descendre dans l cuve, à diverses profondeurs, une colonne de tuyaux d'a moins $0^m,10$ de diamètre par l'extrémité desquels le gaz sor tait avec une grande vitesse. Le tube aspirateur venait plon ger au milieu de ce courant rapide. Aucune prise de gaz n' été faite toutes les fois qu'une diminution survenue dans l vitesse de sortie a pu me faire craindre quelque obstructio sur la longueur ou à la base de la colonne de tuyaux. Dan les parties inférieures du fourneau, les prises de gaz ont été faites au moyen d'ouvertures percées au fleuret dans la maçonnerie.

Pour analyser les gaz, j'ai employé, au lieu de la méthode eudiométrique dont les résultats étaient alors fort incertains, un procédé d'analyse par les pesées, dont je vais rappeler le principe. Les gaz étaient recueillis bien secs sur le mercure dans une cloche graduée d'environ 2 litres, d'où ils passaient, après avoir été mesurés, dans les appareils suivants : 1° un appareil à boules de Liebig rempli de potasse dissoute et suivi d'un tube rempli de potasse solide pour absorber l'acide carbonique; 2° un tube rempli

(1) Je ne rapporte pas ici les conclusions d'un premier travail fait peu de temps après celui de M. Bunsen, mais sans que je connusse ses résultats. Les gaz n'avaient été analysés qu'au gueulard du fourneau (p. 224).

d'oxyde de cuivre, pesé exactement avant l'expérience, et qui servait à brûler les gaz combustibles ; 3° un tube contenant du chlorure de calcium ; 4° un appareil à boules de Liebig rempli de potasse liquide, et suivi d'un tube rempli de potasse solide. Ces derniers appareils servaient à condenser l'eau et l'acide carbonique provenant de la combustion par l'oxyde de cuivre. Une disposition particulière permettait de remplacer tout l'air contenu dans les tubes au commencement de l'expérience par de l'azote pur et parfaitement sec, dont on faisait passer une nouvelle quantité à la fin de l'opération pour balayer tout l'appareil. La perte de poids du tube à combustion donnait l'oxygène absorbé par la transformation des gaz combustibles en eau et acide carbonique, et l'on avait ainsi trois données d'où l'on pouvait déduire les proportions relatives d'hydrogène, d'oxyde de carbone et d'hydrogène protocarboné. L'azote pouvait être dosé directement et même plusieurs fois dans la même analyse, de façon qu'il était possible de vérifier son dosage par différence, avantage que la méthode eudiométrique ne donne jamais.

Cette méthode m'a fourni, dans plusieurs expériences successives faites sur les mêmes gaz, des résultats remarquablement concordants, et qui m'ont donné une confiance entière dans son exactitude.

Analyse des gaz du haut fourneau de Clerval. — Le tableau suivant renferme les analyses des gaz du fourneau de Clerval. Chacune des analyses est en général la moyenne de plusieurs expériences.

On voit immédiatement par ce tableau : 1° que la vapeur d'eau se dégage entre $1^m,33$ et $2^m,67$ de profondeur, sans que les autres éléments du gaz éprouvent de variations notables dans leurs proportions relatives ; 2° que de $2^m,67$ à $5^m,67$ (ventre) la proportion d'acide carbonique diminue très-rapidement, tandis que celle de l'oxyde de carbone augmente d'une manière correspondante ; d'où l'on peut con-

clure avec certitude, que dans cette région du fourneau y a réduction du minerai par la transformation de l'oxy de carbone en acide carbonique; 3° que dans toute la régi inférieure du haut fourneau jusque dans le voisinage tuyères, il n'y a plus d'acide carbonique.

PROFONDEUR au-dessous du gueulard.	Au gueulard.	A 1m,33.	A 2m,67.	A 4m,00.	A 5m,33.	A 5m,67 (ventre)	A 7m,80.	A 8m (tympe)
Acide carbonique.	12,88	13,76	13,96	8,86	2,23	0,00	0,31	0,00
Oxyde de carbone.	23,51	22,24	22,65	28,18	33,64	35,01	41,59	51,35
Hydrogène	5,82	6,00	5,44	3,82	3,59	1,92	1,42	1,25
Azote....	57,79	57,80	58,15	59,14	60,54	63,07	56,68	47,40
Totaux...	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Oxygène rapporté à 100 vol. d'azote...	42,7	43,3	43,1	38,9	31,0	27,8	»	»
Vapeur de carbone pour 100 v. d'azote...	31,5	31,4	31,3	31,3	29,6	27,7	»	»
Vapeur d'eau pour 100 v. de gaz....	11,9	13,4	2,06	0,9	0,4	»	»	»

Le haut fourneau de Clerval marchait au charbon de bois et à l'air chaud. Le fourneau d'Audincourt, sur lequel j'ai continué mes expériences, brûlait un mélange de bois en nature et de charbon. Sa hauteur était de 11 mètres. Avan

l'aspirer les gaz pour en faire l'analyse, j'ai cherché à reconnaître, par des expériences directes, la position de la zone de carbonisation du bois dans la cuve du fourneau; j'ai trouvé que le bois se carbonisait tout entier dans une zone comprise entre $3^m,00$ et $4^m,00$ de profondeur au-dessous du gueulard, et que, dans toute la partie de la cuve supérieure à cette zone, la température du milieu gazeux était si faible, que les minerais ne perdaient pas même leur eau de mouillage. La température du courant s'était abaissée, sur 1 mètre de hauteur, du rouge vif au-dessous de 100 degrés, par suite de l'absorption de chaleur produite par la distillation du bois. Dans toute la partie du fourneau supérieure à la zone de distillation, aucune réaction chimique n'avait donc pu se produire entre les minerais et les gaz de la colonne ascendante. Les gaz aspirés au-dessous de la zone de distillation, jusque dans le voisinage de la tuyère, ont donné à l'analyse des résultats identiques à ceux qui avaient été obtenus dans le fourneau de Clerval, et de la même netteté.

En opérant sur les hauts fourneaux au coke de Vienne et de Pont-l'Évêque, j'ai obtenu, dans deux nouvelles séries d'analyses, des résultats tout à fait comparables à ceux que les hauts fourneaux au charbon de bois m'avaient fournis; seulement, dans les hauts fourneaux au coke, la zone de réduction des minerais paraît plus rapprochée du gueulard que dans le fourneau au charbon de bois. La zone dans laquelle il n'existe que de l'oxyde de carbone et peu ou point d'acide carbonique, s'étend du voisinage de la tuyère jusque vers le milieu de la cuve.

Analyse du gaz du haut fourneau de Bârum (Norwége). — MM. Scheerer et Langberg ont employé les mêmes méthodes que M. Bunsen, tant pour puiser les gaz dans le haut fourneau que pour les analyser. Le haut fourneau marchait au charbon de bois et au vent chaud. Il avait $^m,534$ de hauteur.

Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau suivant (1).

PRISE DU GAZ au-dessus de la tuyère.	(1) A 7m,010.	(2) A 6m,157.	(3) A 5m,484.	(4) A 4m.633.	(5) A 3m,862.	(6) A 3m,046.
Acide carbonique.	22,20	18,21	12,45	4,27	8,50	5,69
Oxyde de carbone.	8,04	15,33	18,57	29,17	20,28	26,38
Hydrogène protocarboné.....	3,87	1,28	1,27	1,23	1,18	»
Hydrogène.....	1,46	2,53	4,51	1,05	3,92	2,96
Azote.....	64,43	62,65	63,20	64,28	66,12	64,97
Totaux.....	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Oxygène pour 100 volumes d'azote.	40,7	41,3	34,4	29,3	28,2	29,0
Vapeur de carbone pour 100 v. azote.	26,5	27,8	25,5	26,9	22,7	25,7

Dans les expériences qui précèdent, on voit la proportion d'oxygène combiné dans les gaz diminuer assez régulièrement à mesure qu'on s'enfonce dans le fourneau, résultat qui est d'accord avec les expériences faites à Clerval; mais on peut observer les variations assez difficiles à expliquer dans la proportion d'acide carbonique. Ce gaz diminue d'abord assez régulièrement à mesure qu'on s'enfonce, de 22,20 à 4,27 pour 100, puis il redevient égal à 8,50, 0m,762 plus bas, pour redescendre à 5,69, à 0m,914 au-dessous. Les nombres qui représentent le carbone combiné

(1) *Annales de Poggendorff*, t. LX, p. 489. — *Annales des Mines*, 4e série, t. VI, p. 3 (1844).

dans le gaz présentent aussi des anomalies. Les gaz des parties inférieures du fourneau n'ont point été analysés (1).

Analyse du gaz du haut fourneau d'Alfreton. — MM. Bunsen et Playfair ont examiné, en dernier lieu, les gaz du haut fourneau d'Alfreton qui marche à la houille crue (2). Ce haut fourneau a $12^m,192$ de hauteur. L'air est chauffé à 330 degrés centigrades, et pénètre dans le fourneau sous une pression de $0^m,20$ de mercure. Le haut fourneau produit par jour 5,200 kilogrammes de fonte. Les gaz ont été aspirés jusqu'à la profondeur de $7^m,315$ par un tube en fer de $0^m,025$ de diamètre. A la profondeur de $10^m,363$, c'est-à-dire dans le voisinage des tuyères, ils ont été extraits par une ouverture pratiquée dans la maçonnerie.

MM. Bunsen et Playfair ont constaté au fourneau d'Alfreton un fait qui avait été remarqué dès 1842 dans le fourneau au charbon de bois de *Maria Zell*, en Styrie, la production du cyanure de potassium dans les portions du fourneau voisines de la tuyère. Ils ont été conduits par cette remarque à rechercher l'existence du cyanogène dans les gaz de la partie inférieure du fourneau.

Le goudron ne s'est montré dans les tubes d'aspiration que dans les expériences (3), (4) et (5). Au-dessous, la lamme était d'un bleu pur et non lumineuse.

L'analyse des gaz a été faite comme celle des gaz du fourneau de Veckerhagen. L'hydrogène bicarboné avait été bsorbé par l'acide sulfurique fumant avant l'introduction e l'oxygène. Les gaz combustibles ont été déterminés à aide du calcul, connaissant l'oxygène absorbé, l'acide arbonique produit, et l'absorption déterminée par la détonation.

Voici les résultats obtenus :

(1) Les dimensions linéaires de ce fourneau étaient exprimées dans le émoire original en pieds et pouces; on les a transformées en mètres en doptant $0^m,3048$ pour la longueur du pied.

(2) *Report of the Bristish association for the advancement of science*, for 845, p. 142.

Haut fourneau d'Alfreton.

NUMÉROS DES ANALYSES. Prise du gaz au-dessous du gueulard	(1) A 1m,524.	(2) A 2m,436.	(3) A 3m,352.	(4) A 4m,267.	(5) A 5m,179.	(6) A 6m,096.	(7) A 7m,010.	(8) A 7m,315.	(9) A 10m,363.
Acide carbonique	7,77	9,42	9,41	9,10	12,43	10,83	8,19	10,08	0,00
Oxyde de carbone	25,97	20,24	23,16	19,32	18,77	19,48	26,97	25,19	37,43
Gaz des marais	3,75	8,23	4,58	6,64	4,31	4,40	1,64	2,23	0,00
Hydrogène	6,75	6,49	9,33	12,42	7,62	4,83	4,92	5,65	3,18
Gaz oléfiant	0,43	0,85	0,95	1,57	1,38	0,00	0,00	0,00	0,00
Cyanogène	»	»	»	»	»	»	traces	traces	1,34
Azote	55,35	55,77	52,57	50,95	55,49	60,46	58,28	56,75	58,05
Totaux	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Oxygène pour 100 volumes d'azote	37,5	35,0	39,9	36,8	39,3	34,0	37,2	40,0	»
Vapeur carbone par 100 volum. d'azote	34,6	35,5	37,1	37,4	34,5	28,7	32,0	33,0	»

MM. Bunsen et Playfair tirent de leur travail diverses conclusions que je vais indiquer :

Le gaz des marais descend jusqu'à près de $7^m,315$ de profondeur. Or, comme il ne peut être produit que par la distillation de la houille, il en résulte que la conversion de la houille en coke n'est complète qu'à cette profondeur de $7^m,315$.

Les auteurs ajoutent : « Les analyses démontrent que la » proportion de l'azote dans les gaz est à son minimum à la » profondeur de $4^m,267$, tandis que les gaz hydrogénés » sont, au contraire, au maximum. Or, comme le gaz hy- » drogène est uniquement produit par la houille sous l'in- » fluence d'une haute température, il en résulte ce fait, » *que la distillation de la houille atteint son maximum à la* » *profondeur de* $4^m,267$.

» On a remarqué, dans les expériences, que les gaz, » jusqu'à une profondeur de $4^m,267$, sont exempts de » vapeur de goudron, mais qu'à partir de ce point jusqu'à » la profondeur de $5^m,179$, ils en sont abondamment » chargés. La disparition de ces vapeurs, dans les parties » supérieures du fourneau, démontre donc que, lors de » leur passage à travers la couche incandescente de houille, » elles éprouvent une décomposition par suite de la haute » température qui y règne et de la vapeur d'eau qui est » présente; ce qui explique les rapports irréguliers qu'on » observe, dans les régions supérieures du fourneau, entre » l'acide carbonique et l'oxyde de carbone. »

Après une longue discussion des résultats de leurs analyses, les auteurs arrivent à ces conclusions : « 1° que dans » les hauts fourneaux anglais la composition moyenne » des gaz, dans les points où le dégagement des gaz pro- » duits par la distillation est à son maximum, ne peut » être fixée exactement; 2° que la réduction du minerai » et le dégagement de l'acide carbonique de la castine » ont lieu dans la portion inférieure du fourneau et les

» étalages, c'est-à-dire entre $7^m,315$ et $10^m,363$ de pro-
» fondeur. »

On peut comparer ces résultats avec mes expériences déjà citées sur le haut fourneau d'Audincourt, où l'on consommait un mélange de bois en nature et de charbon. Des expériences directes m'ont appris que dans toute la partie de la cuve supérieure à la zone de distillation, il n'y avait ni réduction de minerai, ni même dessiccation du bois. Les expériences que j'ai faites en 1837 au haut fourneau de Vellexon (p. 158) m'avaient conduit aux mêmes conclusions. Il est regrettable que des expériences semblables n'aient point été faites à Alfreton. Il ne me paraît pas possible d'admettre avec MM. Bunsen et Playfair, que si l'on ne trouve du goudron que dans les gaz recueillis entre $4^m,267$ et $5^m,179$ de profondeur, il faut l'attribuer à la décomposition éprouvée par les vapeurs de ce goudron en traversant *les couches supérieures incandescentes de houille*. S'il existe, en effet, au-dessus de la profondeur de $4^m,267$, une zone incandescente, on ne comprendrait pas comment la houille arriverait à cette profondeur de $4^m,267$ sans avoir perdu au moins une grande partie de son goudron, et comment elle peut traverser cette zone où le goudron se décompose pour arriver à une profondeur plus grande où le goudron ne fait que se dégager. Ce qui est infiniment probable, c'est que la distillation de la houille ne commence réellement qu'à $4^m,267$ de profondeur, et que le minerai et le combustible froids, qui occupent toute la partie supérieure de la cuve, servent d'appareils de condensation pour les vapeurs de goudron. J'avoue que je ne comprends pas non plus comment la forte proportion d'hydrogène (12,42 pour 100) qu'on a trouvée dans les gaz pris à $4^m,267$ de profondeur, prouverait que la distillation de la houille atteint son maximum dans cette zone. S'il n'y a pas réduction du minerai de fer dans toute la partie supérieure de la cuve en raison de l'abaissement de la température, il est évident que tout

l'hydrogène trouvé à $4^m,267$ doit se retrouver dans les gaz au gueulard.

Les huit premières analyses de MM. Bunsen et Playfair se rapportent toutes à des gaz qui n'ont point agi sur le minerai de fer, puisque la proportion d'oxygène combiné qu'ils renferment à $7^m,315$ de profondeur est plus grande même que celles qu'ils contiennent au gueulard. Je ne puis donc considérer ces analyses comme exprimant les modifications successives qu'éprouve, dans un haut fourneau marchant d'une manière normale, le courant gazeux ascendant. Tout le travail de MM. Bunsen et Playfair se résume pour moi dans deux analyses : l'une quelconque ou la moyenne des huit premières analyses, et la neuvième qui a été faite sur des gaz extraits à $1^m,828$ au-dessus des tuyères. Cette dernière analyse a vérifié le fait que j'avais constaté le premier dans toutes mes expériences, la disparition complète de l'acide carbonique dans le gaz pris à une petite distance de la tuyère jusqu'à une certaine hauteur dans le fourneau, où l'acide carbonique reparaît en raison de la réduction de l'oxyde de fer par l'oxyde de carbone.

MM. Bunsen et Playfair ont comparé la méthode eudiométrique qu'ils ont suivie à la méthode d'analyse par l'oxyde de cuivre que j'ai employée. Ils insistent sur ce que cette méthode n'a pas donné de gaz des marais dans les analyses des gaz du fourneau de Clerval. Cette absence du gaz des marais prouve, d'après eux, le peu d'exactitude de mon procédé, et ils en concluent qu'on doit accorder peu de confiance aux résultats de mes analyses.

On me permettra de répondre aux critiques de ces savants distingués, et de comparer avec quelques détails les deux procédés d'analyse.

Toutes les personnes qui s'occupent d'analyses chimiques savent combien est délicate et souvent incertaine la détermination des éléments d'un corps, quand elle doit s'opérer à l'aide du calcul, et que l'un ou plusieurs de ces éléments

ne sont qu'en petite proportion dans le composé. Si nous prenons, par exemple, un mélange de chlorure de potassium et de chlorure de sodium, on peut déterminer avec facilité par le calcul les proportions relatives des deux chlorures, si l'on connaît leur poids total et le poids du précipité qu'ils produisent quand on les décompose par le nitrate d'argent. La détermination sera suffisamment exacte, si les deux chlorures sont tous les deux en forte proportion; elle deviendra très-incertaine par rapport à l'un deux, s'il ne se trouve qu'en très-petite quantité dans le mélange. On pourrait être amené ainsi à conclure que l'un des chlorures se trouve en petite quantité dans le mélange, alors qu'il n'y existerait pas réellement, ou à admettre le résultat inverse, suivant le sens des erreurs de l'expérience; une méthode directe de dosage est alors bien préférable.

Dans la méthode de M. Bunsen, comme dans la mienne, les proportions des trois gaz combustibles, oxyde de carbone, hydrogène et gaz des marais, sont déduites du calcul. Les éléments qui servent de base au calcul, dans la méthode de combustion par l'oxyde de cuivre, sont: la perte de poids du tube à combustion, l'augmentation de poids du tube à chlorure de calcium, l'augmentation du poids de l'appareil à potasse. Si l'air n'a pas été complétement expulsé de l'appareil avant l'analyse par le courant d'azote qui y circule, s'il y a un peu d'air mélangé avec les gaz analysés, la perte de poids du tube à combustion sera trop faible, et par conséquent les analyses pourraient n'indiquer que de l'oxyde de carbone et de l'hydrogène, dans le cas même où il y aurait de l'hydrogène carboné. Dans ce procédé, les causes d'erreur sont évidemment dans le sens que j'indique. Elles tendent à diminuer la proportion d'hydrogène carboné.

On peut signaler bien des causes d'erreur dans la méthode eudiométrique de M. Bunsen. Je ne parle pas des difficultés qu'on éprouve à constater exactement le volume et la température des gaz, leur degré d'humidité; ce sont là des

causes d'erreur bien connues que M. Bunsen n'évite pas complétement, mais qui peuvent agir tantôt dans un sens et tantôt dans un autre. Il y en a d'autres qui agissent toujours dans le même sens. M. Bunsen absorbe l'excès d'oxygène par le phosphore, et il admet que l'acide phosphoreux et le phosphore en vapeur dans l'azote qui reste augmentent son volume de $\frac{1}{40}$. Je ne sais d'après quelles expériences il est permis d'admettre l'exactitude de cette correction. MM. Scheerer et Langberg ont reconnu qu'elle était *presque toujours* trop forte. Cette cause d'erreur affecte directement l'oxygène absorbé par la combustion des gaz.

M. Bunsen absorbe l'acide carbonique par la potasse solide après la combustion des gaz, sans avoir préalablement desséché ceux-ci. Il en résulte une erreur sur la contraction de volume résultant de la détonation, et une autre erreur sur la détermination de l'acide carbonique produit (1).

On sait quelle difficulté on éprouve à avoir des gaz absolument purs. Supposons une petite quantité d'azote dans l'oxygène introduit, il est facile de voir qu'on serait conduit à admettre pour l'oxygène absorbé dans la détonation un nombre trop fort de tout le volume du gaz étranger, et cette circonstance tend à augmenter la proportion de l'hydrogène carboné.

Une autre cause d'erreur dans les analyses eudiométriques de mélanges d'azote et de gaz combustibles a été signalée par MM. Bunsen et Kolbe (2), par MM. Regnault et Reiset (3), et enfin par M. Doyère (4). Quand on fait détoner en présence d'un excès d'oxygène un mélange de gaz combustibles et d'azote, il se forme des composés nitreux toutes les fois que le mélange détonant forme une fraction un peu considérable du mélange total. D'après

(1) *Voyez* la note page 396.
(2) *Annalen der Chemie und Pharmacie*, t. LIX, p. 208.
(3) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XXVI, p. 350.
(4) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XXVIII, p. 24 et 52.

MM. Regnault et Reiset, la formation des produits nitreux ne commence que quand le mélange détonant forme les 45 pour 100 du gaz. D'après M. Doyère, la production de ces composés est déjà sensible quand le mélange détonant d'oxygène et d'hydrogène est le tiers du volume total des gaz. En présence du mercure et d'un excès d'oxygène humide, les produits nitreux donnent lieu à du nitrate de protoxyde de mercure. Il est clair que cette formation conduit à des nombres trop forts pour l'oxygène absorbé dans la détonation, et par conséquent à une quantité trop considérable d'hydrogène carboné. Il me paraît difficile que M. Bunsen ait évité dans ses analyses des gaz de Veckerhagen et d'Alfreton, cette cause d'erreur qui n'avait point encore été signalée.

On peut établir, du reste, que les analyses des gaz du haut fourneau de Veckerhagen ont été influencées par les causes d'erreur indiquées. Je rappelle ici les proportions d'hydrogène carboné et d'hydrogène qu'ils renferment.

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Gaz des marais....	3,36	3,10	4,04	2,24	1,07	3,84	1,8[illegible]
Hydrogène.....	1,33	1,27	0,58	1,77	2,17	0,15	1,0[illegible]
Hydrogène contenu dans les deux gaz (volume).....	9,03	7,37	8,66	6,25	4,31	7,83	4,8[illegible]

Le gaz des marais ne peut provenir que de la distillation du charbon de bois dans le haut fourneau. M. Bunsen a reconnu lui-même que la vapeur d'eau, au contact du charbon incandescent, ne produisait que de l'hydrogène et de l'oxyde de carbone. L'hydrogène carboné devait donc être en proportion plus faible par rapport à l'hydrogène total que dans les produits de la distillation du charbon.

Pour résoudre la question de la composition des gaz produits par la distillation du charbon, j'ai rempli une cornue de porcelaine de charbon de bois de chêne de Clerval, desséché préalablement à une température de 120 degrés.

Les gaz ont été recueillis au bout d'un certain temps, quand on a pu penser que tout l'air avait été expulsé de l'appareil. Le premier produit de cette distillation devait renfermer plus d'hydrogène carboné que tous les autres. Je l'ai analysé dans l'eudiomètre de M. Regnault. L'acide carbonique a été absorbé par la potasse dans le laboratoire de l'eudiomètre, puis on a fait détoner les gaz avec un excès d'oxygène. La contraction de volume a été mesurée, puis l'acide carbonique a été absorbé par la potasse. Le résidu renfermait l'excès d'oxygène; on l'a fait détoner avec un excès d'hydrogène pour s'assurer s'il n'y avait pas d'azote dans le mélange gazeux. Les gaz ont été calculés comme il a été dit plus haut. On a obtenu :

	Volumes.
Acide carbonique.	3,1
Hydrogène.	73,3
Hydrogène protocarboné.	11,8
Oxyde de carbone	11,3
Azote.	0,5
	100,0

La proportion de l'hydrogène protocarboné trouvé dans cette analyse correspond à 23,6 d'hydrogène.

Ainsi l'hydrogène protocarboné forme moins de $\frac{1}{6}$ du volume de l'hydrogène libre et $\frac{1}{8}$ seulement du volume total de l'hydrogène. On comprend donc difficilement comment il se trouve en proportion trois fois plus considérable que l'hydrogène dans les gaz du fourneau de Veckerhagen pris près du gueulard, et comment il se fait qu'il y ait 3,84 d'hydrogène carboné, et seulement 0,15 d'hydrogène dans les gaz pris à 3^m,657 de profondeur.

Appliquons les mêmes résultats aux gaz du fourneau de Clerval, dont les analyses n'ont pas accusé d'hydrogène carboné. La proportion d'hydrogène contenue dans les gaz au gueulard est de 5,82 pour 100; pris au ventre du fourneau, ils en contiennent encore 1,92 pour 100, et cet hy-

drogène provient tout entier de la décomposition par le charbon de la vapeur d'eau contenue dans l'air, puisque le charbon arrive au ventre du fourneau complétement calciné. La portion d'hydrogène qui provient de la distillation du charbon est donc de 3,90. Si nous admettons que l'hydrogène protocarboné s'y trouve en même proportion que dans l'analyse citée plus haut des gaz de la distillation, on trouvera que sur les 3,90 d'hydrogène, il devait y avoir 12 pour 100 ou seulement 0,47 pour 100 d'hydrogène carboné. J'admets volontiers que la méthode d'analyse employée pour les gaz du fourneau de Clerval ne m'ait pas permis de reconnaître et de doser 4 à 5 millièmes de gaz des marais existant dans les gaz au gueulard, et qui ne se retrouve plus dans les parties inférieures du fourneau. Cette exactitude absolue, fort désirable dans tous les cas, n'était pourtant pas nécessaire pour atteindre le but que je me proposais. Qu'il y ait ou qu'il n'y ait pas dans le gaz au gueulard des hauts fourneaux au charbon de bois quelques millièmes d'hydrogène protocarboné, la question est assurément de bien peu d'importance; mais je ne saurais admettre que la méthode de M. Bunsen, qui trouve près de 4 pour 100 d'hydrogène carboné dans des gaz qui n'en renferment pas, soit plus exacte que la mienne qui aurait laissé échapper quelques millièmes du même gaz.

Ce n'est pourtant pas à la méthode d'analyse de M. Bunsen que j'attribuerai les différences essentielles qui se présentent entre ses résultats et les miens. M. Bunsen a rendu assurément la méthode eudiométrique plus précise qu'elle n'était avant lui, et je suis convaincu qu'il aurait parfaitement reconnu la succession des phénomènes qui se passent dans les hauts fourneaux sans une circonstance dont ni M. Bunsen ni MM. Scheerer et Langberg ne me paraissent avoir soupçonné l'importance. L'emploi d'un tuyau étroit, formé par des canons de fusil soudés et descendant dans le

haut fourneau à une profondeur considérable, me paraît un très-mauvais moyen d'obtenir des gaz dont la composition moyenne soit celle de la zone qui correspond à sa partie inférieure. Un tuyau aussi étroit s'engorgera certainement par du minerai et du charbon qui modifieront la composition des gaz provenant de l'orifice inférieur. J'ai toujours eu soin, dans mes expériences, de me servir de tuyaux d'un grand diamètre. Le courant de gaz qui en sortait était animé ordinairement d'une vitesse assez grande pour projeter au dehors des fragments de charbon et des grains de minerai. Je crois que si M. Bunsen eût employé ce mode d'extraction, s'il eût percé le fourneau dans ses parties inférieures, il aurait constaté dans les gaz du haut fourneau de Veckerhagen les mêmes modifications progressives de composition que j'ai signalées depuis à Clerval et à Audincourt, au lieu des anomalies inexplicables et des résultats contradictoires que présente la succession de ses analyses.

Pour justifier, autant qu'il dépendait de moi, les résultats de mes précédentes recherches, j'ai voulu vérifier, par une méthode eudiométrique aussi précise que possible, les conclusions auxquelles j'avais été conduit par la méthode des pesées. J'ai donc recommencé deux nouvelles séries d'expériences, l'une sur les gaz du haut fourneau de Clerval, qui roule au charbon de bois; l'autre sur les gaz d'un des hauts fourneaux au coke de l'usine de Seraing (Belgique).

Analyse des gaz du haut fourneau de Clerval.

Les dimensions du haut fourneau de Clerval, en octobre 1848 (1), époque à laquelle j'ai effectué mes prises de

(1) M. Auguste Bouchot, l'un des propriétaires des hauts fourneaux de Clerval, a bien voulu mettre à ma disposition tous les moyens qu'il possédait pour l'exécution de mes expériences. Je lui renouvelle ici tous mes remercîments pour la bienveillance amicale qu'il m'a témoignée.

gaz, étaient très-notablement différentes de ce qu'elles étaient en septembre 1841. La hauteur totale avait été portée de $8^m,67$ à $10^m,00$ et le diamètre au grand ventre de $2^m,16$ à $2^m,50$. Le haut fourneau présente en outre une partie cylindrique de $0^m,50$ de hauteur entre les deux troncs de cône, qui constituent l'un la cuve, l'autre les étalages. Voici, du reste, les principales dimensions du fourneau :

	m
Diamètre au gueulard...	0,56
Hauteur de la cuve.....	6,67
Hauteur de la partie cylindrique..	0,50
Diamètre au ventre.....	2,50
Hauteur des étalages.....	2,03
Hauteur de l'ouvrage.....	0,40
Hauteur du creuset.	0,40
Distance de la tuyère au contrevent.	0,58
Hauteur totale du fourneau.....	10,00

Le haut fourneau marchait à l'air froid. On avait supprimé l'emploi de l'air chaud comme nuisible à la qualité des fontes, bien qu'il produisît une économie notable sur la consommation du combustible. La buse a $0^m,063$ de diamètre, et la tuyère $0^m,09$ de largeur sur $0^m,10$ de hauteur.

La charge se composait de :

	m.c		kil	
Charbon de bois.....	0,500	pesant	115	
Minerais en grains divers.....	0,100	—	180	310
Minerai calcaire de Laissey.....	0,065	—	115	
Castine.....	0,010	—	15	

On passe trente-deux charges par 24 heures. La coulée se fait après vingt charges et produit 1,800 kilogrammes de fonte noire pour seconde fusion. La production journalière est donc d'environ 2,800 à 2,900 kilogrammes de fonte.

Le vent était injecté dans le fourneau sous une pression de $0^m,033$ de mercure. La soufflerie était mise en mouvement par une machine à vapeur dont le générateur était alimenté par les gaz du gueulard. Ceux-ci se rassemblaient

dans un espace annulaire ménagé au sommet du fourneau autour d'un cylindre en fonte qui recevait la charge, et ils étaient amenés ensuite sur le sol de l'usine jusque sous la chaudière où on les enflammait.

Les gaz ont été recueillis en cinq points différents du haut fourneau dans de larges tubes en verre auxquels on avait soudé des tubes plus étroits aux deux extrémités. Les tubes étroits convenablement étirés ont été mis en communication, d'une part avec la source de gaz, d'autre part avec un aspirateur. On les fermait à la lampe, après y avoir fait passer deux ou trois litres de gaz du haut fourneau.

L'analyse en a été faite dans l'eudiomètre décrit par MM. Regnault et Reiset (1). On sait que dans cet appareil toutes les opérations de mesurage de gaz se trouvent ramenées à des déterminations de hauteur d'une colonne de mercure et de la pression barométrique, et qu'on n'a à s'inquiéter ni de la température qui reste constante, ni de l'état hygrométrique, attendu que les gaz sont toujours mesurés saturés de vapeur d'eau, et que la correction à faire se trouve donnée immédiatement par les tables qui indiquent les tensions maxima de la vapeur d'eau aux diverses températures.

Les gaz ont été traités d'abord par la potasse, pour absorber l'acide carbonique, puis mêlés avec de l'oxygène. On a fait passer une étincelle électrique dans le mesureur. La diminution de pression résultant de la détonation a été mesurée, puis on a absorbé l'acide carbonique par la potasse. L'oxygène restant avec l'azote a été déterminé par une nouvelle combustion avec un excès d'hydrogène.

On a admis, pour calculer les proportions des gaz combustibles, que ceux-ci étaient formés d'hydrogène, d'hydrogène protocarboné et d'oxyde de carbone.

Le tableau suivant fait connaître les résultats obtenus.

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XXVI, p. 333.

GAZ PRIS AU-DESSOUS DU GUEULARD.	A 1 mètre.		A 3 mètres.		A 6 mètres.		A 8m,55.	A la tympe.
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
Acide carbonique	12,01	11,95	4,14	4,23	0,49	0,07	0,00	0,93
Oxyde de carbone	24,65	23,85	31,56	31,34	35,05	35,47	37,55	39,86
Hydrogène	5,19	4,31	3,04	2,77	1,06	1,09	1,13	0,79
Hydrogène protocarboné	0,93	1,33	0,34	0,77	0,36	0,31	0,10	0,25
Azote	57,22	58,56	60,92	60,89	63,04	63,06	61,22	58,17
Totaux	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Oxygène pour 100 volumes d'azote	42,5	40,8	32,7	32,7	28,5	28,2	30,7	35,8
Vapeur carbone pour 100 volumes d'azote	32,8	31,7	29,6	29,6	28,5	28,5	30,7	35,3

(1). Gaz pris dans la conduite qui amène les gaz du haut fourneau sous la chaudière à vapeur. La prise des gaz est à $1^m,00$ environ de l'orifice de chargement. L'aspiration a été faite très-peu de temps avant qu'on introduisît la charge. Il se dépose beaucoup d'eau dans les tubes d'aspiration.

(2). Gaz pris après le précédent, un quart d'heure après la charge.

(3) et (4). Gaz pris à $3^m,00$ de profondeur au-dessous du gueulard, au moyen d'une colonne de tuyaux en fonte de $0^m,10$ de diamètre. Les gaz sortent de ce tuyau avec bruit et en produisant une flamme de près d'un mètre de hauteur. Des fragments de charbon et de petits grains de minerai sont projetés au dehors.

L'analyse (4) s'applique au même gaz que l'analyse (3), elle a été faite exactement dans les mêmes conditions que la première, c'est-à-dire en opérant sur le même volume de gaz et employant à très-peu près les mêmes quantités d'oxygène pour effectuer la combustion. Il s'est formé une petite quantité de produits nitreux dans la détonation en présence d'un excès d'oxygène.

(5). Gaz pris à $6^m,00$ de profondeur, au moyen d'une ouverture pratiquée dans la maçonnerie du fourneau, et qui donne issue à un courant rapide de gaz qui vient brûler à l'air avec une flamme bleuâtre.

(6). Gaz pris dans le même orifice que le précédent, une heure après environ.

(7). Gaz pris dans un orifice percé dans la maçonnerie du fourneau à la rustine, c'est-à-dire sur la face opposée à la poitrine du fourneau. Cet orifice est à $1^m,05$ au-dessus de la tuyère. Le gaz sort de cet orifice avec force et vient brûler à l'air avec une flamme blanche et des fumées épaisses d'oxyde de zinc. On a extrait les gaz en faisant plonger dans l'orifice un tube de porcelaine à l'extrémité duquel on effectuait l'aspiration.

(8). Gaz pris en introduisant dans la tympe, à $0^m,40$

de profondeur, un canon de fusil dans lequel on avait placé un tube de porcelaine. Le courant de gaz qui se dégageait de ce tuyau était assez rapide pour projeter au dehors du laitier et de la fonte incandescente. On a pu néanmoins aspirer le gaz sans trop de difficulté.

Les gaz extraits de la partie inférieure du fourneau de Clerval entraînent des proportions assez considérables de vapeur de zinc. Je n'y ai pas rencontré de cyanogène, bien que j'aie cherché à le reconnaître dans les gaz des expériences (5) à (8).

Les résultats des analyses précédentes sont complétement d'accord avec ceux obtenus par la méthode de combustion au moyen de l'oxyde de cuivre, à une exception près, qui se rapporte à la présence de quelques millièmes d'hydrogène carboné. Or, comme les produits obtenus dans les détonations en présence d'un excès d'oxygène renfermaient incontestablement de petites quantités de produits nitreux qui avaient attaqué le mercure, il est permis de penser que, sans cette circonstance, on n'aurait point trouvé d'hydrogène carboné dans les dernières analyses, et que la proportion de ce gaz contenu dans les gaz du gueulard aurait été réduite à 6 ou 7 millièmes au plus. On peut remarquer également qu'en ajoutant au nombre qui représente l'hydrogène le double du volume du gaz des marais, représentant l'hydrogène contenu dans ce gaz, on arrive à des résultats qui se confondent pour ainsi dire avec ceux de la méthode par les poids.

Les conclusions qu'on peut tirer des analyses qui précèdent sont absolument les mêmes que celles de mon précédent travail. On voit que l'acide carbonique, qui existe en proportion assez forte dans les gaz du gueulard, diminue rapidement à mesure qu'on descend dans le fourneau, tandis que l'oxyde de carbone augmente. A la profondeur de 6 mètres, l'acide carbonique a disparu et ne se retrouve plus que tout à fait à la base du fourneau.

En examinant les nombres qui représentent l'oxygène et le carbone rapportés aux 100 volumes d'azote, on voit la réduction suivre une marche progressive de la profondeur de $6^m,00$ au gueulard. L'oxygène combiné s'élève de 28,2 à 42,5. La proportion de carbone s'élève, dans la même zone, de 28,5 à 32,8, résultat qui provient tant de l'acide carbonique dégagé par la castine et le minerai calcaire, que des produits gazeux de la distillation du charbon. On voit que la réduction du minerai est déjà très-avancée à $6^m,00$ de profondeur, et qu'elle s'opère, pour ainsi dire, sans consommation de charbon, par la transformation de l'oxyde de carbone en acide carbonique.

Les proportions d'hydrogène et d'hydrogène carboné renfermés dans les gaz suivent une marche inverse de celle de l'oxyde de carbone. Elles tendent à augmenter depuis les étalages jusqu'au gueulard. Il semble donc que l'hydrogène n'exerce aucune action réductive dans le fourneau.

Tous ces faits sont absolument les mêmes que ceux que j'avais précédemment signalés et développés (pages 314 et suivantes).

Une seule circonstance mérite d'être remarquée : la zone de réduction est évidemment plus voisine du gueulard dans ces dernières expériences que dans celles faites en septembre 1841; à $3^m,00$ de profondeur, les gaz ne renferment plus que 4,2 pour 100 d'acide carbonique. Dans les expériences de septembre 1841, la réduction ne commençait pas encore à $2^m,67$ de profondeur, puisque l'acide carbonique était à son maximum dans cette région du fourneau. A $4^m,00$ au-dessous du gueulard, la quantité d'acide carbonique était encore de 8,86 pour 100. Il est permis d'attribuer cette différence de position de la zone de réduction à la substitution de l'air froid à l'air chauffé que l'on employait en 1841. On sait, en effet, que l'emploi de l'air chaud a pour résultat d'élever la température dans les régions inférieures du fourneau et de l'abaisser, au contraire, dans la

cuve. J'ai donné de ce fait une explication qui me paraît s'accorder de tout point avec les circonstances de sa production (page 331).

Les analyses (7) et (8), faites sur des gaz pris à $1^m,05$ de la tuyère et à la tympe, peuvent être rapprochées de celles faites en 1841 à $0^m,44$ au-dessus de la tuyère et à la tympe. La proportion d'oxyde de carbone s'élève très-notablement au-dessus de celle qui serait contenue dans un gaz formé par de l'air dont l'oxygène serait changé en oxyde de carbone (34,4 pour 65,6 azote); mais la différence est moins grande ici que dans les analyses de 1841, où la quantité d'oxyde de carbone contenue dans les gaz pris à la tympe s'était élevée à 51,35. Ce fait me paraît pouvoir être attribué à la rapidité du courant, lors de la dernière expérience. L'oxyde de carbone produit par la réaction des laitiers ferreux sur le carbone de la fonte se trouvait en proportion moindre, par rapport au gaz de la colonne ascendante, que dans les expériences précédentes (p. 313). La rapidité de la sortie des gaz explique aussi la présence d'une certaine quantité d'acide carbonique dans les gaz pris sous la tympe.

Je me dispenserai de déterminer ici les nombres qui représentent la puissance calorifique des gaz du fourneau de Clerval, le rapport de cette valeur au pouvoir calorifique du charbon consommé, les quantités d'air à employer pour la combustion, les températures maxima que ces gaz peuvent produire, etc.; ces déterminations ont été faites, on les trouvera plus loin dans un Mémoire qui traitera spécialement de l'emploi des gaz combustibles provenant des hauts fourneaux. Il m'a semblé qu'il y aurait peu d'intérêt à reproduire des calculs analogues à ceux que j'ai présentés plus haut pour les fourneaux de Vienne et de Pont-l'Évêque (p. 376), et qui conduiraient à des résultats presque identiques à ceux que je donnerai pour le fourneau de Clerval, comme correspondant au roulement de 1841.

Analyse des gaz du haut fourneau de Seraing.

Les expériences ont été faites en septembre 1848 sur le haut fourneau n° 6 de l'usine de Seraing. M. Coste, ancien préparateur de l'École des Mines de Paris, aujourd'hui chargé de la direction des hauts fourneaux de Seraing, a bien voulu faire prendre quelques dispositions pour l'extraction des gaz à diverses hauteurs. J'ai eu également l'avantage de me rencontrer dans cette usine avec un savant métallurgiste belge, M. Valérius, dont on connaît l'excellent ouvrage sur la fabrication du fer, et qui m'a communiqué beaucoup de renseignements intéressants pour esquels je le prie d'agréer tous mes remercîments.

Voici les principales dimensions du fourneau sur lequel es expériences ont été faites :

	m
Hauteur de la cuve.....	8,128
Diamètre au gueulard.....	2,743
Diamètre au ventre.....	4,570
Hauteur des étalages.....	4,521
Largeur en haut de l'ouvrage..	1,092
Hauteur de l'ouvrage.....	1,320
Largeur entre les tuyères.....	0,914
Hauteur du creuset.....	0,813
Hauteur totale du fourneau...	15,240

e fourneau est à deux tuyères. La quantité de vent que les uses lancent dans le fourneau est de 122 mètres cubes par minute sous une pression de 0,05 de mercure. L'air est chauffé à 100 degrés.

La charge se compose de :

	kil
Minerais non grillés..... ..	650
Scories de forge de chaufferie.....	650
Castine.....	450
Coke, 2 mètres cubes, ou.....	800

On coule toutes les douze heures, et l'on obtient 8,500 kilo-

grammes de fonte blanche un peu cristalline, que l'on coule en plaques minces et que l'on passe dans les fours à puddler sans mazéage préliminaire.

Le rendement des minerais est de 42 pour 100 et la consommation en coke d'environ 1,500 kilogrammes au 1,000 kilogrammes de fonte (Valérius). Elle s'élève 1,800 ou 2,000 kilogrammes pour 1,000 de fonte quand fourneau marche en fonte de moulage. Le haut fourneau était en feu depuis un an, quand les expériences ont été faites.

Les gaz ont été pris au moyen d'un tuyau enfoncé dans la cuve jusqu'à $3^m,567$ de profondeur. Dans la partie inférieure du fourneau, ils ont été extraits par une ouverture pratiquée dans la maçonnerie.

Dans tous les cas, de même que pour les expériences exécutées à Clerval, les gaz ont été recueillis en cinq points dans de larges tubes en verre, aux extrémités desquels on avait soudé d'autres tubes plus étroits, convenablement étirés et qui communiquaient d'une part avec la source de gaz, de l'autre avec un aspirateur. On les fermait à la lampe après avoir fait passer deux ou trois litres de gaz. On faisait l'analyse dans l'eudiomètre de MM. Regnault et Reiset.

Les gaz ont été traités d'abord par la potasse, pour absorber l'acide carbonique, puis mêlés avec de l'oxygène. On a fait détoner. La diminution de pression a été mesurée; puis on a absorbé l'acide carbonique par la potasse. L'oxygène restant avec l'azote a été déterminé par une nouvelle combustion par un excès d'hydrogène.

Ainsi les méthodes d'analyse sont celles employées pour déterminer la composition des gaz de Clerval. Elles ont donné des résultats aussi concordants pour ces deux fourneaux que ceux trouvés primitivement pour les fourneaux d'Audincourt et de Vienne, de Clerval et de Pont-l'Évêque. La méthode d'analyse n'a donc pas eu d'influence sur mes conclusions. Voici les résultats obtenus :

[illegible] (Belgique).

GAZ PRIS AU-DESSOUS DU GUEULARD.	A $0^m,304$		A $1^m,220$	A $2^m,743$	A $3^m,048$		A $3^m,657$	A $13^m,716$
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Acide carbonique	11,39	11,39	9,85	1,54	1,08	1,13	0,10	»
Oxyde de carbone	28,61	28,93	28,06	33,88	35,20	35,35	36,30	45,05
Hydrogène	2,74	3,04	0,97	0,69	1,72	2,08	2,01	0,25
Hydrogène protocarboné	0,20	»	1,48	1,43	0,33	0,29	0,25	0,07
Azote	57,06	56,64	59,64	62,46	61,67	61,15	61,34	54,63
Totaux	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Oxygène pour 100 volumes d'azote	45,0	45,6	40,0	29,6	30,2	30,6	29,9	41,2
Vapeur de carbone pour 100 volumes d'azote	35,2	35,7	33,0	29,4	29,6	30,0	29,9	41,3

(1). Le gaz est pris en enfonçant dans le gueulard un tube en fer d'environ $0^m,03$ de diamètre à $0^m,305$ environ de profondeur. Le tube aspirateur vient plonger dans ce tuyau d'où le gaz se dégage avec abondance.

(2). Cette analyse a été faite sur le même gaz que gaz (1).

(3). Gaz pris à $1^m,220$ de profondeur dans les mêmes conditions que le gaz (1). Le courant qui s'échappe de l'extrémité du tuyau est assez rapide et vient s'enflammer spontanément à l'air.

(4). Courant rapide de gaz, s'enflammant spontanément; flamme bleuâtre.

(5) et (6). Gaz pris à $3^m,048$ de profondeur. Il en a été fait deux analyses consécutives.

(7). Gaz pris par le tuyau en fer à $3^m,657$ de profondeur. Le tuyau de fer a été retiré du fourneau après cette prise de gaz. Son extrémité était encore chauffée au rouge cerise quand il a été retiré.

(8). Gaz pris à la rustine par une ouverture pratiquée dans la maçonnerie, à $0^m,609$ environ au-dessus des tuyères. Les gaz qui se dégagent par cet orifice sont accompagnés d'une fumée blanche abondante qui contient, d'après M. Valérius, du cyanure de potassium; d'après ce métallurgiste, les fumées blanches qui se dégagent avec abondance du gueulard des hauts fourneaux de Seraing et que l'on attribuait exclusivement à l'oxyde de zinc, contiendraient également de fortes proportions de cyanure alcalin.

J'ai recherché le cyanogène dans le gaz (8). La potasse ne diminue pas leur volume d'une quantité appréciable. Ils ne renferment donc ni acide carbonique, ni acide sulfhydrique, ni cyanogène.

Si l'on compare les résultats des analyses qui précèdent avec ceux des gaz des fourneaux au coke de Vienne et de Pont-l'Évêque (p. 357 et 358), on sera conduit aux mêmes conclusions théoriques. On voit l'acide carbonique diminuer très-

rapidement, en même temps que l'oxygène combiné dans le gaz, à mesure qu'on s'enfonce dans la cuve, ce qui prouve qu'une réduction énergique s'opère par l'oxyde de carbone dans le voisinage du gueulard sous l'influence de la haute température que possède encore dans cette région le courant gazeux ascendant. C'est aussi dans cette région, comprise entre $0^m,304$ et $2^m,743$ de profondeur, que s'opère la calcination de la castine. La composition des gaz en fournit une preuve directe. En effet, la quantité de vapeur de carbone rapportée à 100 volumes d'azote est à $2^m,743$ de profondeur de 29,4 à 30,0 et au gueulard de 35,2 à 35,7. Le coke ne dégage qu'une quantité presque insignifiante de produits carbonés par la distillation. La réduction du minerai se fait dans cette région par la transformation de l'oxyde de carbone en acide carbonique, sans changement de volume et sans consommation de charbon. D'un autre côté, l'augmentation dans la proportion d'hydrogène est trop peu considérable pour que l'on puisse admettre que la vapeur d'eau en se décomposant a pu dissoudre une quantité notable de charbon. On ne peut expliquer cet accroissement rapide dans la proportion du carbone combiné qu'en l'attribuant à la décomposition de la castine.

On peut vérifier, du reste, par la comparaison des résultats des analyses avec les données inscrites plus haut sur le roulement du fourneau, si les analyses peuvent représenter la moyenne du courant gazeux qui s'échappe du gueulard.

Les minerais rendent en moyenne 42 pour 100 de fonte. On admet à Seraing que la richesse des minerais et des scories de forges est à peu près la même. Le coke contient en moyenne :

Carbone	91,00
Eau et produits volatils	3,00
Cendres	6,00
	100,00

Cela posé, la charge contient :

					kil.
Coke.....	800	correspondant à carbone pur.....			72[illegible]
Castine...	450	200 acide carbonique.	Carbone....		[illegible]
		250 chaux.	Oxygène....		1[illegible]
1300 kil. minerais et scories.	Scories...	650	contenant	oxygène du protoxyde de fer.	76
	Minerais..	650		oxygène du peroxyde de fer.	117

On a donc :

		kil
Carbone total.....		782
Oxygène	de la castine..... 146	341
	des scories..... 76	
	des minerais..... 117	

Si les analyses des gaz du gueulard représentaient bien la composition moyenne au sortir du fourneau, les poids de l'oxygène et du carbone inscrits plus haut devraient être dans le même rapport que le carbone et l'oxygène des gaz, en déduisant de ce dernier la proportion correspondante à l'azote renfermé dans le gaz. Or le nombre qui représente l'oxygène au gueulard est égal à 45,0, et en en déduisant 26,3 qui correspondent à l'azote, de 18,7 : les rapports de l'oxygène et du carbone sont de 18,7 à 35,2 en volumes, et en poids de 18,7 à 26,4. Le rapport est ici d'environ 3 à 4 tandis qu'il devrait être inférieur à $\frac{1}{2}$ d'après les nombres donnés plus haut.

Il faut conclure de là que les analyses des gaz du gueulard ne représentent pas la composition moyenne du courant gazeux à sa sortie. Ce fait se conçoit du reste assez aisément, et il doit se produire toutes les fois qu'on soutire le gaz par un orifice d'une section faible par rapport à celle du fourneau, dans une région ou des réactions chimiques s'opèrent avec rapidité. Le courant gazeux n'a pas partout la même vitesse dans tous les points d'une même section horizontale; il est beaucoup plus rapide le long des parois de la cuve. La portion de ce courant qui filtre à travers le mi-

ɜrai et la castine doit nécessairement éprouver des modi-
ɜations plus profondes dans sa composition que le gaz qui
dégage le long des parois, et se charger d'une proportion
us forte d'oxygène et d'acide carbonique.

Il est évident qu'on atténuera d'autant plus cette diffé-
ɜnce entre la composition moyenne du courant et celle des
ɪz qui se dégagent par le tuyau abducteur, que la section
ɜ celui-ci sera une fraction plus considérable de la section
orizontale du fourneau correspondant à son extrémité.
a section du tube dont nous nous sommes servis à Se-
ɪing, à défaut d'un plus large, n'était que le 0,0001 de la
ɪrface du gueulard. Les tuyaux dont je m'étais servi pour
rendre les gaz à Clerval et à Audincourt avaient une sec-
on égale au trentième de la surface du gueulard, et le cou-
ɪnt s'en échappait avec une grande vitesse, ce qui per-
ɪettait d'en conclure que l'analyse des gaz de ce courant
evait représenter avec précision la composition moyenne
e la tranche gazeuse correspondante.

Quand on arrive dans une région du fourneau où la
omposition de la tranche gazeuse varie peu sur une faible
auteur, on conçoit que le gaz sortant par un orifice
troit pourra représenter assez exactement la composition
oyenne, puisque celle-ci est alors sensiblement la même
ur tous les points d'une même section horizontale. Ainsi,
uand on arrive dans le haut fourneau de Seraing à $3^m,657$
le profondeur, l'acide carbonique a disparu et ne repa-
raît plus que vers la tuyère du fourneau. Dans cet espace
le $10^m,060$ formant les deux tiers de la hauteur du four-
neau, le courant gazeux est essentiellement formé d'oxyde
le carbone et d'azote dans des proportions qui varient très-
lentement. La proportion d'oxygène dans l'air atmosphé-
rique est de 26,3 pour 100 volumes d'azote. Elle est de
29,9 à $3^m,657$ de profondeur. La différence 3,6 repré-
sente l'oxygène enlevé au lit de fusion depuis la tuyère jus-
qu'à cette hauteur. Le rapport du poids de cet oxygène au

poids du carbone contenu dans les gaz est celui de 3,6 à 22,4 ou 16 pour 100. Or le rapport de l'oxygène contenu dans le protoxyde de fer des scories de forges au carbone du coke est de 70 : 728 ou 11 pour 100 seulement; en sorte qu'on pourrait admettre que la réduction des silicates de fer qui constituent les scories de forges s'opère tout entière dans la zone comprise entre $3^m,657$ de profondeur et la tuyère. On sait que les silicates de fer se réduisent bien plus difficilement que les oxydes, mais cette réduction paraît néanmoins pouvoir s'effectuer par l'hydrogène et par l'oxyde de carbone dans les régions fortement échauffées du haut fourneau. Des expériences faites en 1839 au fourneau de Clerval (p. 206), ont montré que des scories riches appelées *sornes* se réduisaient lentement par cémentation dans la partie inférieure de la cuve. Il est clair que la réduction pourra être d'autant plus complète que le temps pendant lequel elle pourra s'opérer sera considérable. Or, cette condition est évidemment remplie dans les hauts fourneaux qui, comme celui de Seraing, présentent un très-grand volume à l'intérieur et une température élevée sur une très-grande partie de leur hauteur. La réduction des scories de forges dans les régions fortement échauffées donne lieu à la formation d'une quantité correspondante d'oxyde de carbone, et par conséquent à une consommation de combustible. Cette réaction produit aussi une absorption considérable de chaleur latente, ainsi que j'ai eu occasion de le démontrer (p. 327).

La proportion très-considérable d'oxyde de carbone que l'on rencontre dans les gaz pris à $13^m,716$ de profondeur est un fait qui s'est présenté dans les analyses des gaz de tous les hauts fourneaux à cette hauteur. J'ai essayé de donner l'explication de cette circonstance à l'occasion des analyses des gaz pris à la tympe du fourneau de Clerval.

La zone de réduction des minerais autres que les scories de forges est placée tout près du gueulard du haut four-

neau. C'est là un fait qui paraît commun à tous les fourneaux au coke, car je l'avais observé déjà dans les hauts fourneaux de Vienne et de Pont-l'Évêque. Il est dû sans aucun doute à la température élevée que possèdent les gaz jusque dans les parties supérieures de l'appareil. L'élévation de température des gaz doit être attribuée à la consommation du combustible plus forte dans les fourneaux au coke que dans les fourneaux au charbon de bois. Le haut fourneau de Seraing consommait 728 kilogrammes de carbone réel pour 546 kilogrammes de fonte, soit 133 de carbone pour 100 de fonte. Cette consommation est faible pour un haut fourneau au coke, mais elle est encore plus considérable que celle des hauts fourneaux au charbon de bois marchant en fonte blanche d'affinage, qui ne consomment que 75 de carbone réel pour 100 de fonte produite. Cette plus grande consommation de combustible, dont j'ai essayé d'indiquer la cause dans un de mes précédents Mémoires (p. 368), donne lieu à un volume plus considérable de produits gazeux, et partant à une température bien plus élevée dans les régions supérieures du fourneau. C'est probablement à cette circonstance que tient le succès de l'emploi des scories de forges en proportion considérable dans le lit de fusion de ce haut fourneau au coke. On sait en effet qu'il suffit d'introduire une faible quantité de ces scories dans la charge des hauts fourneaux au charbon de bois pour en altérer très-notablement la marche, blanchir les fontes et corroder rapidement les parois de l'ouvrage. Les scories fondent alors sans être complétement réduites, et arrivent rapidement devant la tuyère du fourneau.

Résumé.

Les recherches qu'on vient de lire me paraissent confirmer de la manière la plus nette les conclusions de mes précédents Mémoires sur la composition des gaz des hauts fourneaux et sur les réactions chimiques qui se passent

dans ces appareils. Ces six séries d'expériences, faites sur six hauts fourneaux différents, dont les uns marchent au charbon de bois, les autres au coke, qui roulent les uns à l'air chaud, les autres à l'air froid, conduisent toutes à des conclusions parfaitement comparables entre elles : les différences constatées entre les diverses séries d'analyses sont la conséquence rationnelle des différences que présente le roulement de ces fourneaux.

Les analyses faites par la méthode eudiométrique ont été presque complétement d'accord avec celles faites antérieurement par l'oxyde de cuivre. Quelques millièmes d'hydrogène protocarboné ont été obtenus dans les analyses eudiométriques; mais il est bien établi que ce gaz existe seulement dans la partie supérieure du fourneau au charbon de bois, qu'il y est en proportion insignifiante, et de plus qu'il ne paraît exercer aucune action appréciable dans les phénomènes chimiques qui s'y produisent.

On peut donc, je crois, considérer comme constants et parfaitement établis les faits suivants qui résultent tant de ce travail que des précédents :

1°. L'air atmosphérique, lancé dans la tuyère du haut fourneau, produit successivement de l'acide carbonique et de l'oxyde de carbone à une faible distance de l'orifice d'entrée. La première de ces réactions donne lieu à une température extrêmement élevée; la seconde, au contraire, produit une absorption considérable de chaleur latente et un abaissement correspondant dans la température du courant gazeux. Les limites de *la zone de fusion* sont en rapport avec celles de l'espace dans lequel s'est effectuée cette transformation de l'acide carbonique en oxyde de carbone.

2°. Le courant ascendant, formé d'oxyde de carbone, d'un peu d'hydrogène et d'azote, produit en s'élevant dans le fourneau deux effets distincts : il communique une partie de la chaleur sensible qu'il possède aux matériaux de la colonne descendante; il se charge de tous les produits volatils

qui se dégagent à diverses hauteurs dans le fourneau; il réduit enfin l'oxyde de fer à l'état métallique. Tantôt cette transformation donne lieu à un accroissement dans la proportion d'oxyde de carbone; tantôt, au contraire, elle s'opère par le changement de l'oxyde de carbone en acide carbonique sans changement de volume et sans consommation de combustible.

Toutes les fois que la réduction de l'oxyde de fer se fait avec production d'oxyde de carbone, il y a consommation de combustible et absorption de chaleur latente. Il importe donc au bon roulement du fourneau que le minerai arrive déjà complétement réduit dans la portion où la température est suffisamment élevée pour que l'acide carbonique s'y change en oxyde de carbone au contact du charbon. Cette condition se réalise à peu près, soit dans les hauts fourneaux au charbon de bois, soit dans les hauts fourneaux au coke quand l'oxyde de fer est à l'état libre dans le minerai. La réduction de l'oxyde de fer en combinaison avec la silice exige au contraire l'intervention d'une haute température; elle ne s'opère que dans la zone où l'acide carbonique a complétement disparu.

3°. La zone où l'oxyde de carbone existe seul est beaucoup plus étendue dans les hauts fourneaux au coke que dans les fourneaux au charbon de bois. La zone de réduction par l'oxyde de carbone est beaucoup plus rapprochée du gueulard dans les fourneaux au coke que dans les fourneaux au charbon de bois; elle s'abaisse au contraire dans la cuve quand on substitue l'air chaud à l'air froid, le combustible restant le même. Toutes ces circonstances s'expliquent naturellement par les différences constatées dans les consommations des divers combustibles, ou du même combustible dans les divers états de roulement.

4°. Les matières volatiles combustibles que dégage le charbon de bois à la distillation se retrouvent dans les gaz du gueulard et ne paraissent exercer aucune action réduc-

tive sur le minerai contenu dans le haut fourneau; cette circonstance s'explique par la masse considérable de l'oxyde de carbone par rapport à celle des autres produits gazeux.

VIII.

Recherches sur l'emploi des gaz comme combustible.

Je commencerai ce Mémoire par le détail de quelques essais faits au fourneau de Vellexon, dans le but de chercher à utiliser pour la réduction du minerai les vapeurs combustibles qui s'échappent du gueulard.

Entre le gueulard et le four à air chaud se trouve un four peu étendu, sur la sole duquel nous avons placé le minerai à réduire : on avait fermé aussi bien que possible la plupart des ouvertures qui permettaient le mélange de l'air extérieur avec les gaz du gueulard, de manière à ce que la flamme conservât ses propriétés réductives. La température du four suffisait pour la cuisson de la chaux. Le minerai soumis au grillage était celui de la fontaine Godard. J'ai examiné deux échantillons retirés après une demi-heure et après deux heures de grillage; tous les deux étaient très-magnétiques; l'acide chlorhydrique les attaque facilement sans dégagement de gaz. La proportion relative des deux oxydes de fer a été recherchée au moyen de l'acide sulfureux et du chlorure de barium.

Le minerai, après 2 heures de grillage, renferme :

		Oxygène.	Rapports.
Argile et silice gélatineuse...	0,07	»	
Alumine soluble.....	0,07	»	
Peroxyde de fer.....	0,57	0,175	3
Protoxyde de fer.....	0,26	0,059	1
Oxyde de manganèse.....	0,02		
	0,99		

Le minerai retiré après une demi-heure, a donné :

Sulfate de baryte	0,91
Correspondant à peroxyde de fer	0,61
D'où protoxyde	0,23

Ces résultats prouvent que les minerais se réduisent facilement en oxyde magnétique, mais qu'ils ne dépassent pas ce degré de réduction. En disposant le gueulard d'une manière plus convenable, afin de pouvoir introduire des quantités d'air déterminées dans le mélange réductif, et en mêlant le minerai avec de la sciure de bois, on parviendrait sans doute à une réduction beaucoup plus avancée.

Jusqu'à ces derniers temps, malgré ces faits, qui sont d'une date déjà ancienne, l'emploi des gaz des hauts fourneaux n'était utilisé généralement que pour certains usages qui n'exigent pas une très-haute température, comme le chauffage de l'air ou des chaudières à vapeur, la torréfaction du bois, la cuisson de la chaux ou des briques. Le gaz s'enflammait naturellement à sa sortie du gueulard et s'introduisait avec une certaine quantité d'air atmosphérique dans les fours où sa chaleur devait être utilisée. Un registre placé au-dessus de la cheminée par où s'échappaient les produits de la combustion était le seul moyen de régulariser l'introduction de l'air.

Dans ce mode de combustion des gaz, on obtenait rarement une température très-élevée; j'attribue ce résultat aux causes suivantes :

Les flammes qui se prolongent souvent à une grande distance de l'orifice du four, prouvent que le mélange du gaz combustible avec l'air comburant ne se fait que lentement. Il en résulte que le lieu du maximum de température se déplace constamment dans le four, suivant la direction prise par le courant d'air et de gaz, et ce maximum doit être à une assez grande distance du point où commence l'inflammation. En outre, il n'est pas possible de régler

d'une manière convenable la quantité d'air nécessaire à la combustion. Enfin, les gaz, à leur sortie du fourneau, renferment une proportion assez considérable de vapeur d'eau, variable avec l'allure du fourneau aux différentes époques de la charge, et la présence de ce corps, dont le calorique spécifique est très-considérable, diminue très-notablement la température de combustion.

Pour atteindre un haut degré de chaleur par la combustion des gaz du fourneau, il faut donc satisfaire aux conditions suivantes :

1°. Brûler un gaz contenant peu ou point de vapeur d'eau.

2°. Opérer la combustion du gaz dans un espace très-rétréci, de façon que le maximum de température se produise toujours dans la même partie du four, et à une petite distance de l'orifice d'arrivée.

3°. Rendre l'arrivée des gaz dans le four indépendante des charges, et pouvoir régler à volonté la proportion d'air nécessaire à la combustion.

Toutes ces conditions se trouvent réalisées dans l'appareil que M. Faber-Dufaur a établi à Vasseralfingen pour le puddlage de la fonte, appareil que l'on monte actuellement dans plusieurs usines françaises (1). Je dois me contenter ici de donner une idée générale des dispositions qu'il présente :

---

(1) M. Sire, actuellement employé aux usines de Clerval, a pris en 1836 un brevet d'invention pour le puddlage de la fonte au four à réverbère, au moyen des gaz du haut fourneau. Le gaz était pris à la base de la cuve. M. Sire n'a pas fait l'application des procédés décrits dans son brevet, mais sa date lui donne le droit incontestable de participer à l'honneur de l'invention.

A l'occasion d'une communication, faite par extrait, de mon travail à l'Académie des Sciences, MM. D'Andelarre, Thomas et Laurens m'ont adressé une réclamation de priorité relative à l'invention du procédé du puddlage au gaz des hauts fourneaux. Ce procédé est maintenant employé régulièrement à l'usine de Tréveray (Meuse). J'inscris ici cette réclamation, en faisant observer que je ne prétends en rien préjuger la question de propriété du procédé, question à laquelle je dois rester tout à fait étranger.

En avant de la sole du four à puddler, se trouve une ouverture étroite, occupant toute la largeur du four, par laquelle arrive le courant de gaz. Plusieurs tuyères parallèles placées au-dessus de cette ouverture, lancent de l'air chauffé à 200 ou 300 degrés sur le courant, de manière à opérer presque instantanément le mélange de cet air avec le gaz. Le lieu de la combustion est placé dans le four, à une faible distance de l'orifice de sortie du gaz, et dans une position presque invariable. On se trouve donc dans les meilleures conditions pour obtenir la température indiquée par la théorie. La sole du four à puddler est établie comme dans tous les appareils analogues. La chaleur que conservent les gaz produits par la combustion est utilisée, à la sortie du four, pour chauffer l'air.

Le gaz est pris à peu près à la moitié de la hauteur de la cuve, par des ouvertures pratiquées sur les parois du fourneau. On n'a donc pas à craindre l'influence de la vapeur d'eau et les irrégularités provenant de l'introduction des charges dans le fourneau.

La fonte, avant d'être puddlée, subit à Vasseralfingen un commencement de décarburation dans un four à peu près semblable au four à puddler, qu'on appelle four à blanchir; mais cette opération préliminaire ne paraît nullement nécessaire. Les massiaux de fer brut obtenus par le puddlage, sont portés au blanc soudant dans un autre four aussi alimenté par la flamme du gaz.

L'empressement que mettent les maîtres de forges français à essayer les procédés de M. Faber-Dufaur, prouve qu'ils en comprennent toute l'importance, et l'influence que leur application doit avoir sur l'avenir de la fabrication du fer au charbon de bois et sur les conditions d'établissement des usines. Si chaque haut fourneau peut développer, par la combustion de ses gaz, la quantité de chaleur nécessaire à l'affinage de la fonte qu'il produit, il est évident que des fours à gaz et des appareils mécaniques

pour l'étirage du fer, deviendront des accessoires indispensables à tout haut fourneau qu'on voudra faire rouler économiquement. Les usines de cette espèce devront donc pouvoir disposer à l'avenir d'une force motrice supérieure à celle qui leur est actuellement nécessaire. La fonte en gueuses, qui est aujourd'hui le produit marchand livré par les hauts fourneaux aux ateliers d'affinage, sera remplacée par du fer puddlé en gros massiaux, qui sera soudé et étiré dans de grandes usines d'élaboration, placées sur des cours d'eau puissants et à la portée des voies de communication.

Emploi des gaz des hauts fourneaux au charbon de bois.

Pour tirer des analyses rapportées (pages 258 et suiv.) quelques résultats applicables à l'emploi des gaz comme combustible, il faut en déduire, par la comparaison de leurs données avec celles qui résultent du roulement du haut fourneau : 1° la quantité totale de chaleur que peut fournir la combustion du courant de gaz, pris à diverses hauteurs dans le fourneau; 2° le volume de l'air nécessaire dans chaque cas pour leur combustion; 3° enfin, la température maximum qui doit en résulter. Je vais indiquer les bases de ces calculs et en appliquer les résultats, d'abord au fourneau de Clerval, ensuite à celui d'Audincourt.

D'après les données que j'ai inscrites (p. 271) sur le roulement du fourneau de Clerval, on trouve que :

Chaque charge passe moyennement en 53 minutes.

	kil
La quantité de charbon consommée par minute est de.....	2,190
Le poids des minerais et de la castine est dans le même temps.....	5,645
Les matières volatiles (eau, oxygène, acide carbonique).....	1,930
115 kilogrammes de charbon équivalent à charbon sec.....	106,000
Ils renferment en carbone.....	93,200

On a trouvé que pour fondre 1 de minerai et de castine renfermant 0,092 d'acide carbonique, on consommait 0,388 charbon, ou 0,318 carbone. Or, 0,092 d'acide carbonique renfermant 0,025 de carbone, le rapport du carbone de la castine au carbone total contenu dans le courant du gaz, est égal à $\frac{0,025}{0,318+0,025}$ ou les 0,074 p. 100 du carbone total.

D'après les résultats des analyses des gaz du gueulard :

100 volumes d'azote correspondent à 31,5 vapeur de carbone, et en défalquant 7,4 pour 100, à 29,2.

100 d'azote en poids correspondent à 24,9 carbone du charbon; pour $93^{kil},20$ carbone consommé par charge, on a donc introduit dans le fourneau $374^{kil},3$ d'azote correspondant à $486^{kil},1$ d'air atmosphérique.

Par minute on introduit dans le fourneau $9^{kil},17$ ou $7^{m.c},060$ d'air (1).

Le volume du gaz sec qui sort par minute du fourneau sera donné par la proportion

$$79,2 : 58 :: x : 7,060;$$

d'où

$$x = \frac{79,2 \times 7,060}{58} = 9^{m.c},640.$$

---

(1) On peut comparer ce volume à celui lancé par la buse, et qu'on déduira de la formule

$$q = 289\, d^2 \sqrt{\frac{h(1+0,0037\,t)}{b+h}},$$

qui représente le volume d'air lancé par seconde.

On a

d diamètre de l'œil de la buse	=	$0^{m},065$
h pression du manomètre....	=	0,018
t température de l'air.....	=	180°
b pression atmosphérique (moy.)		$0^{m},742$

On trouve $q = 0^{m.c},242$ à 180° et à la pression $b+h$.

Ramené à 0° et à $0^{m},760$ de pression, on a $q' = 0^{m.c},146$ et par minute $8^{m.c},76$.

La perte de vent est donc par minute de $1^{m.c},70$ ou de $\frac{1}{5}$ de l'air lancé par la buse.

On aura le volume total du gaz renfermant la vape d'eau, en ajoutant au nombre précédent 11,90 pour 10 ce qui donne $10^{m.c}$,796.

Pour avoir la quantité de chaleur produite par la co bustion du gaz, il faut remarquer que :

1 litre gaz sec renferme	0,2351 oxyde de carbone 0,0582 hydrogène.....	0,29

L'hydrogène et l'oxyde de carbone produisent, à volu égal, d'après Dulong, sensiblement la même quantité chaleur, 3,130 unités par litre de gaz.

En prenant une unité mille fois plus grande, nous tro verons que 1 litre de gaz sec produit par la combustio 0,918 unités de chaleur, et consomme 0^{lit},147 d'oxygène ou 0^{lit},705 d'air atmosphérique.

La quantité totale de chaleur développée par la combus tion des $9^{m.c}$,640 de gaz sec, sera donc de 8,849,6 c lories (1).

Pour obtenir la température de combustion, on fait calcul suivant :

---

(1) On peut comparer la chaleur développée par la combustion du gaz gueulard à celle que produirait le charbon employé.

Les 2^{k},19 de charbon consommé par minute correspondent à 2^{k},01 charbon sec, qui renferment :

Carbone.....	1,77		
Hydrogène.....	0,06	Hydrogène.....	0,045
Oxygène.....	0,12	Eau.....	0,135
Cendres.....	0,06		
	2,01		

1^{k},77 de charbon donnera 1610 litres vapeur de carbone qui produisent, calories.....	12,651
0^{k},045 hydrogène correspondant à 500 litres : calories.....	1,565
Total.....	14,216

Rapport de la chaleur de combustion du gaz à celle du charbon employé..... 0,6220

Pour 1 litre de gaz sec, qui consomme 0,705 d'air atmosphérique, on a :

		Produits.		Poids.		Produit du poids par la chaleur spécifique.
				lit	gr	
1 lit. gaz sec.	1,000	Acide carbonique contenu dans le gaz.....	0,1288	0,364	0,717	0,158
		Acide carbonique produit par combustion.....	0,2351			
Vapeur d'eau.	0,119	Vapeur d'eau correspondante à 1 litre gaz.....	0,119	0,177	0,143	0,121
		Vapeur d'eau produite par combustion.....	0,058			
Air..... ..	0,705	Azote contenu dans le gaz.....	0,578	1,136	1,485	0,396
		Azote contenu dans l'air introduit...	0,558			
	1,824			1,677		0,675

La température de combustion sera $\frac{918}{0,675} = 1,360°$.

Ce nombre est un minimum, puisque les calculs supposent que la température initiale de l'air et du gaz est égale à zéro (1).

On peut calculer pour le fourneau d'Audincourt des résultats semblables aux précédents.

Pour avoir le volume des gaz sortis par minute du gueulard, on part des données suivantes :

On charge moyennement de 50 en 50 minutes :

Charbon.... ..... 110^{kil}
Bois..... 115

(1) La température des gaz du gueulard est généralement très-peu élevée, même dans les fourneaux où l'on n'emploie que du charbon. Quand on n'utilise pas la flamme perdue, on remarque souvent que les gaz s'éteignent spontanément sans se rallumer, et leur chaleur propre est si faible, qu'on peut tenir la main plongée dans le courant pendant longtemps sans en être brûlé.

Le charbon pris dans la halle renferme :

Humidité.....	8,00
Carbone, matières volatiles et cendres.	92,00
	100,00

après dessiccation, il contient 88 pour 100 de carbone

Le bois employé peut être considéré comme composé

Carbone.....	37,00
Eau.....	63,00
	100,00

On consomme par minute $2^{kil},64$ de carbone.

Un calcul semblable à celui indiqué plus haut] Clerval, donne ce résultat que le carbone provenant c castine forme les 0,066 du carbone total contenu dai gaz.

Or 1 litre de gaz au gueulard renferme 0,18922 va de carbone, et, en faisant la correction, $0^{lit},1745$] 0,55620 azote.

En poids, $0^{gr},188$ pour $0^{gr},700$ azote.

Le poids d'azote contenu dans le gaz expulsé par mi du gueulard sera donné par la proportion :

$$2,64 : 0,188 :: x : 0,700; \quad \text{d'où} \quad x = 9^{k},33,$$

Air atmosphérique..... $12^{k},76 = 9^{m.c},81$ (1).

---

(1) La surface de la buse égale 32,1 centimètres carrés. Elle équivau cercle de $0^{m},0638$ de diamètre.

La formule $q = 289\, d^2 \sqrt{\frac{h(1 + 0,0037\, t)}{b + h}}$ donne, en y subst $d^2 = 0,004088$, $h = 0,070$, $t = 250^{o}$, $b = 0,735$, $q = 0^{m.c},480$, e la pression $b + h$.

Ramené à 0° et à la pression de $0^{m},760$, ce volume devient $q' = 0^{m.c}$ et par minute $15^{m},84$. La perte d'air est donc de $6^{m.c},030$, ou le de la quantité totale. On observe effectivement qu'il y a constamm remous d'air considérable devant la tuyère. On s'en assure en projeta corps légers vers cet orifice ; ils sont toujours chassés en arrière av grande vitesse. J'attribue cette difficulté qu'on éprouve à faire passer l'emploi de la braise et du bois en nature qui produit beaucoup de charbon dans le fourneau.

Fourneau de Clerval.

	VOLUME DU GAZ par minute.		AIR nécessaire à la combustion de 1 litre de gaz sec.	PRODUITS DE LA COMBUSTION sur 1 litre de gaz sec.							QUANTITÉ de chaleur produite en 1 minute,		TEMPÉRATURE de combustion.
	Sec	Y compris la vapeur d'eau.		Acide carbonique.		Vapeur d'eau.		Azote.		Quantité de chaleur nécessaire pour échauffer de 1 degré le mélange brûlé.	par litre de gaz.	par la totalité du gaz.	
				Litres.	Grammes	Litres.	Grammes	Litres.	Grammes				
	m.c	m.c	lit							$(\frac{1}{1000})$	calories.	calories.	deg. c.
Gaz pris au gueulard..	9,640	10,796	0,705	0,364	0,717	0,177	0,143	1,136	1,435	0,675	0,918	8.849,5	1.360
A 2^m,67 de profondeur.	9,640	9,890	0,675	0,364	0,718	0,081	0,065	1,116	1,409	0,601	0,879	8.483,2	1.462
A 4 mètres.....	9,465	9,545	0,769	0,370	0,732	0,048	0,039	1,200	1,516	0,612	1,002	9.484,0	1.637
A 5^m,33.....	9,240	9,280	0,894	0,359	0,709	0,040	0,032	1,313	1,658	0,638	1,165	10.765,0	1.826
A 5^m,67 (ventre).....	8,865	8,865	0,887	0,350	0,693	0,019	0,015	1,337	1,684	0,631	1,156	10.247,0	1.832
Calculé (2).....	8,520	8,520	0,827	0,344	0,685	»	»	1,312	1,653	0,596	1,077	9.176,0	1.807

Haut fourneau d'Audincourt.

	VOLUME DE GAZ dégagé par minute.		AIR nécessaire à la combustion pour 1 litre de gaz sec.	PRODUITS DE LA COMBUSTION SUR 1 LITRE DE GAZ SEC.							QUANTITÉ de chaleur produite en 1 minute,		TEMPÉRATURE de la combustion.
				Acide carbonique.		Vapeur d'eau.		Azote.		Quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 degré la température du mélange brûlé.			
	Sec.	Y compris la vapeur d'eau.		Litres.	Grammes	Litres.	Grammes	Litres.	Grammes		par litre de gaz.	par la totalité du gaz.	
	m.c	m.c	lit							calories $\left(\frac{1}{1000}\right)$	calor.	calor. (1)	deg. c.
Gaz pris au gueulard.	13,98	17,15	0,764	0,378	0,748	0,292	0,238	1,161	1,463	0,766	0,995	13 910	1.298
A 3^m,33.....	14,28	16,71	0,746	0,381	0,756	0,245	0,197	1,135	1,430	0,728	0,975	13.923	1,693
A 4^m,33	13,84	14,03	0,826	0,384	0,762	0,070	0,056	1,215	1,531	0,636	1,077	14.990	1.732
A 5^m,50.	13,44	13,44	0,822	0,375	0,746	0,046	0,037	1,237	1,558	0,624	1,081	14.529	1.850
A 6^m,67.....	13,42	13,42	0,920	0,381	0,756	0,040	0,032	1,307	1,646	0,648	1,199	16.080	1.850
A 8^m,04.....	12,61	12,61	0,917	0,366	0,728	0,018	0,014	1,342	1,691	0,637	1,196	15.084	1.877
Calculé (2).....	11,84	11,84	0,827	0,344	0,685	»	»	1,312	1,653	0,596	1,077	12,752	1.807

(1) On peut comparer le nombre 13,910 avec celui qui représente la valeur calorifique du combustible introduit dans le fourneau. On brûle par minute :

2^{kil},64 carbone qui donnent, calories.....	19,193
Hydrogène correspondant 0,045.....	1,565
Total.....	20,758

La chaleur dégagée par la combustion des gaz du gueulard représente donc les 0,67 du combustible employé.

En partant des bases qui précèdent, on arrive aux résultats compris dans les tableaux que nous venons de présenter avec détails.

Les nombres calculés à leur partie inférieure, l'ont été en admettant qu'on brûle le gaz obtenu en traitant l'air sec par un excès de charbon.

Tous les nombres qu'ils contiennent ont été calculés de la même manière, en admettant que la quantité d'air introduite dans le haut fourneau, par minute, était de $7^{m.c}$,060 pour Clerval, et $9^{m.c}$,81 pour Audincourt.

Les nombres qui représentent les températures de combustion dans les deux tableaux sont évidemment au-dessous de la réalité, puisqu'on les a obtenus en supposant que la température initiale du gaz et celle de l'air comburant étaient égales à zéro. A la quantité de chaleur développée par la combustion, il faudrait pouvoir ajouter celle que le gaz contient à l'état de calorique sensible.

Conclusions.

On peut déduire des deux tableaux qui précèdent les conséquences suivantes :

1°. La quantité de chaleur que le gaz peut produire en brûlant, augmente rapidement à mesure qu'on descend dans le fourneau. Elle atteint son maximum à une petite hauteur au-dessus du grand ventre pour diminuer ensuite très-notablement dans les régions inférieures du fourneau;

2°. La température de combustion augmente rapidement en descendant, surtout dans les fourneaux où l'on emploie du bois en nature, résultat qu'on doit attribuer à la grande proportion de vapeur d'eau contenue dans les gaz jusqu'à une certaine distance du gueulard. Cette température devient sensiblement constante lorsqu'on s'approche des étalages;

3°. La température de la fusion de la fonte étant évaluée, d'après M. Pouillet, à 1,200 degrés, il est évident

qu'on doit arriver à la produire par la combustion des gaz pris à une certaine profondeur, surtout si l'on emploie de l'air chaud, et si l'appareil est disposé de manière à conserver aux gaz une partie de la chaleur sensible qu'ils ont en sortant du fourneau.

Il est hors de doute que la soustraction totale ou partielle du gaz, à diverses hauteurs du fourneau, doit avoir une influence marquée sur son allure. Les résultats des analyses ont fait voir le rôle que joue le courant de gaz qui traverse le fourneau dans la réduction des minerais. Sa chaleur sensible sert à élever progressivement la température des charbons et des minerais, et à chasser l'eau combinée à l'oxyde de fer et aux gangues. A mesure qu'on augmentera la proportion du gaz extrait du fourneau à telle ou telle profondeur, il est évident que sa composition se modifiera et se rapprochera plus ou moins de celle des gaz du gueulard. A la limite, il est clair qu'on arriverait à réduire la hauteur du fourneau de toute la distance de la prise de gaz au gueulard.

Il sera probablement préférable d'employer dans le fourneau des minerais déshydratés par le grillage, et de prendre la totalité du gaz près du gueulard. La température nécessaire pour chasser l'eau de l'hydroxyde de fer est d'environ 300 degrés, et la quantité de chaleur employée ne serait qu'une faible fraction de la chaleur de combustion totale (1).

Nous pouvons maintenant essayer de comparer la quan-

---

(1) On peut calculer l'influence que l'expulsion de l'eau doit avoir sur la température du courant de gaz qui traverse le fourneau.

1°. A Clerval, à une profondeur de $2^{m},67$, le volume du gaz sec qui traverse cette section dans une minute est de $9^{m.c},64$ pesant $12^{k},677$.

La chaleur spécifique moyenne du gaz sec.....	0,275
Quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 degré la température du gaz.	3,486

On consomme par minute :

ti té de chaleur développée par le gaz des hauts fourneaux avec celle qui serait donnée par la houille employée pour le puddlage de toute la fonte produite (1). Mais pour pouvoir faire cette comparaison d'une manière exacte, il faudrait que la température de combustion fût la même dans les deux cas. La quantité absolue de chaleur produite

$2^k,19$ charbon, qui renferment eau hygrométrique.....	0,170
$5^k,645$ minerais, qui renferment eau combinée.....	0,706
Total.....	0,876

En prenant le nombre 550 pour le calorique latent de vaporisation de l'eau, on trouve que l'abaissement de température, provenant de cette cause seule, sera

$$\frac{0,876 \times 550}{3,486} = 138.$$

La quantité de chaleur $0,876 \times 550 = 482$, c'est-à-dire $\frac{1}{18}$ de la chaleur totale de combustion du gaz.

2°. Pour le haut fourneau d'Audincourt, on a vu que la carbonisation du bois et la calcination des minerais s'opéraient à la même hauteur dans le fourneau. On peut admettre, et ce nombre est probablement un *minimum*, que la chaleur latente des produits de la distillation est égale à celle de la vapeur d'eau. Si l'on part de cette donnée, on trouve :

Le volume de gaz sec, à $4^m,33$ de profondeur, est de $13^{m.c},84$ pesant $17^k,715$.

Quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 degré les $13^{m.c},84$. 4,871

On consomme par minute :

	kil
$2^k,2$ charbon renfermant eau hygrométrique.....	0,170
$2^k,3$ de bois rendant 25 pour 100 de charbon, et donnant, eau et matières volatiles.....	1,725
$7^k,360$ minerais contenant, eau.....	0,714
Total.....	2,609

L'abaissement de température du courant de gaz causé par l'absorption de chaleur latente sera, d'après ce qui précède, $\frac{2,609 \times 550}{4,871} = 294°$.

L'abaissement réel de température dans les deux cas est beaucoup plus considérable, puisque les minerais et les charbons s'emparent d'une certaine quantité de chaleur pour se mettre en équilibre avec le courant.

(1) Dans les fours à puddler on brûle en général 110 de houille pour obtenir 100 de fer puddlé brut. L'opération du puddlage s'exécute à la fois sur 190 kilogrammes fonte, qui produisent 175 kilogrammes de fer puddlé. Elle dure une heure un quart. En vingt-quatre heures, un four à puddler ordinaire consommerait 3,648 kilogrammes fonte, et produirait 3,356 kilogrammes

n'est pas le seul élément à considérer dans les fours à puddler, et en général dans tous les fours à réverbère, où il faut arriver à produire un certain degré de température déterminé par la fusion ou le ramollissement d'un métal. Il est évident qu'on parviendra d'autant plus vite au résultat cherché, que la différence entre cette température limite et celle de la combustion sera plus grande. La quantité de chaleur utilisée, ou, si l'on veut, celle qui est prise par la matière à échauffer au courant gazeux, sera, toutes choses égales d'ailleurs, une fraction d'autant plus considérable de la chaleur totale du courant, que cette différence entre les deux températures sera plus forte. Dans tous ces appareils, la consommation en combustible exprimée en calories et rapportée à une quantité constante de métal fabriqué, diminuera à mesure que la température de combustion s'élèvera.

Dans les fours à puddler ordinaires, on n'a d'autre moyen pour faire varier la température de combustion que d'augmenter ou de diminuer le tirage et la charge de la grille. Dans les fours à gaz, en faisant varier la profondeur à laquelle on enlèvera le gaz du fourneau et la température de l'air lancé par les buses, on parviendra au degré de chaleur convenable.

Si l'on veut conserver aux fourneaux un roulement ré-

---

fer en massiaux. On consomme dans chaque opération $192^{k},5$ de houille, et par minute $2^{k},55$. Admettons que chaque kilogramme produise 6,000 calories, la chaleur développée dans le four à puddler par minute sera 15,300 calories. Les gaz du fourneau d'Audincourt, pris à $4^{m},33$, donnent dans le même temps 14,990. La production moyenne du fourneau (du 1er au 28 octobre) a été 3,230 kilogrammes, nombre un peu inférieur à celui qui indique la consommation du four à puddler.

A Clerval, la production moyenne du fourneau a été par jour 2,039 kilogrammes de fonte, dont le puddlage exigerait 2,063 kilogrammes de houille et par minute $1^{k},43$, nombre qui correspond à 8,480 calories.

Les gaz du haut fourneau, pris à 4 mètres de profondeur, donnent en brûlant 9,484 calories.

On n'a tenu compte dans ces calculs, ni de la chaleur propre du gaz, ni de celle apportée par l'air destiné à la combustion.

gulier et économique, je crois qu'il faut peu éloigner les prises de gaz du gueulard, et suppléer, dans ce cas, à la moindre proportion de combustible par un plus grand échauffement de l'air. L'appareil pour le chauffage de l'air est disposé à la suite du four à puddler. On peut, au reste, utiliser toute la chaleur de combustion produite par le gaz, puisqu'il n'est pas nécessaire d'établir de tirage.

En terminant ce travail, je vais examiner s'il n'y aurait pas avantage pour les arts métallurgiques à généraliser le procédé suivi pour la combustion des gaz des hauts fourneaux, et à substituer, dans la plupart des cas où l'on se sert de fours à réverbère, la combustion d'un gaz à celle d'un solide, comme moyen calorifique.

Nous avons trouvé que la combustion du charbon par de l'air en excès à zéro produisait une température de 2,232 degrés.

Avec de l'air à 300 degrés, la température de combustion serait 2,518 degrés.

Ces températures peuvent être considérées comme la limite de celles produites dans les foyers métallurgiques. Le fer malléable et la porcelaine se liquéfient, comme on l'a vu, dans l'espace où l'on approche de ce degré de chaleur; mais ce maximum n'a lieu que dans une étendue très-faible. La conversion de l'acide carbonique en oxyde de carbone abaisse presque instantanément la température du courant.

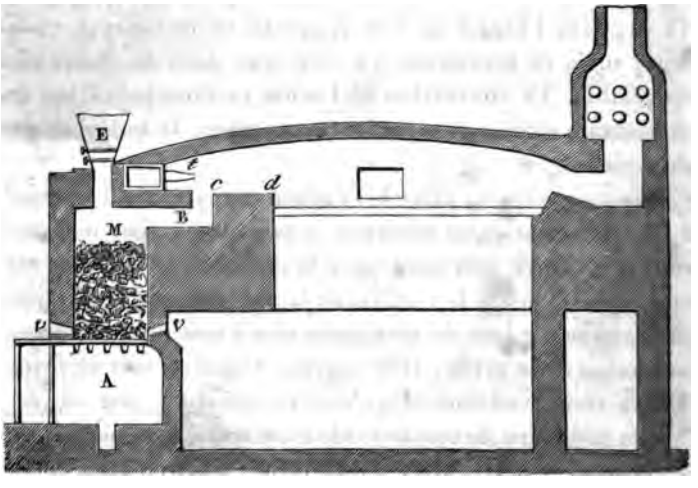
Supposons qu'on place le charbon sur la grille d'un four à réverbère, et qu'on alimente la combustion par un courant d'air forcé introduit sous la grille. Si le charbon est en couche épaisse, le résultat de la réaction sera de l'oxyde de carbone. Le lieu du maximum sera à une petite hauteur au-dessus de la grille, et le courant de gaz sortant du foyer n'aura comparativement qu'une température peu élevée. Si, au contraire, le combustible est en couche mince, il ne se formera que de l'acide carbonique, mais on empêchera

difficilement le mélange d'un excès d'air avec le produit de la combustion, si l'on évite la production de l'oxyde de carbone. L'excès de charbon ou l'excès d'air tendent également à abaisser la température du courant.

Mais si la grille est chargée d'une hauteur de charbon suffisante pour transformer tout l'oxygène de l'air en oxyde de carbone, et si, en même temps, on brûle le courant de gaz produit par l'air injecté à la fois par plusieurs orifices il est évident qu'on arrivera à développer dans cette combustion la température produite par la formation de l'acide carbonique, au moyen de l'air et du charbon, si toutefois l'appareil est disposé de manière que le mélange d'oxyde de carbone et d'azote ne perde pas de sa chaleur sensible en arrivant sur l'aire où la combustion doit s'opérer. On voit aussi que le lieu du maximum ne sera pas restreint à un petit espace, comme dans les fourneaux à cuve.

Toutes les conditions que je viens de signaler me paraissent faciles à réaliser dans la pratique.

La figure ci-dessous représente la coupe longitudinale d'un four établi d'après ces principes.



Le vent froid, destiné à la production du gaz oxyde de carbone, arrive dans la chambre A, à double porte, sous une tension supérieure à la pression atmosphérique. L'air traverserait toute l'épaisseur du combustible placé dans le fourneau cylindrique M, et produirait successivement de l'acide carbonique, puis de l'oxyde de carbone : un rampant amène le gaz devant les tuyères *t*, qui projettent de l'air chauffé et brûlent complétement le gaz dans l'intervalle *cd*, placé un peu en avant de la sole du four. Le combustible peut être introduit dans le cubilot par un distributeur mécanique ou par une trémie à double registre E. Enfin, un ouvrier peut séjourner dans la chambre A pour décrasser la grille, etc.

J'ai indiqué à la suite du four à puddler l'appareil destiné au chauffage de l'air qui serait projeté par les tuyères *t*.

Au lieu d'employer de l'air seulement pour produire le gaz, il serait, je crois, préférable d'introduire en même temps une certaine quantité de vapeur d'eau par une ou deux ouvertures *v* placées immédiatement au-dessus de la grille. La vapeur d'eau, comme nous l'avons vu plus haut, produit sur le charbon incandescent le même effet que l'acide carbonique, et son emploi permettra de diminuer, autant qu'on le voudra, la température de combustion du charbon au-dessus de la grille dans le foyer M, et par conséquent la température des gaz qui s'échappent par le rampant. Mais en même temps on augmentera proportionnellement le volume des gaz combustibles dans le mélange gazeux, puisque le produit de la réaction de la vapeur d'eau sur un excès de charbon est un mélange d'hydrogène et d'oxyde de carbone.

Le gaz produit par l'air et le carbone en excès a pour composition :

Oxyde de carbone.....	34,43
Azote.....	65,57
	100,00

dont la température de combustion est 1,807 degrés, en le supposant à la température zéro.

Le gaz produit par le charbon et la vapeur d'eau a pour composition :

Oxyde de carbone.....	0,50
Hydrogène.....	0,50
	1,00

Il exige pour sa combustion complète 0^{lit},50 d'oxygène ou 2^{lit},400 d'air, et sa température de combustion, calculée comme plus haut, serait 2,662 degrés, en le supposant à zéro et le brûlant par de l'air également à zéro.

La présence des gaz provenant de la vapeur d'eau dans le mélange tendra donc à élever la température de combustion.

Pendant le séjour que j'ai fait à Audincourt, M. Jeanmaire a bien voulu m'autoriser à tenter quelques essais dans ce sens. M. Page, ancien élève de l'école des mineurs de Saint-Étienne, qui venait d'étudier le puddlage au gaz à Vasseralfingen, m'a été d'un très-grand secours pour la construction et la conduite des petits fours d'essai, et je lui en fais ici tous mes remercîments.

Le petit four à puddler que nous avons fait établir n'avait que 1^{m},50 de longueur de sole sur 0^{m},60 de largeur devant la porte. Le gaz combustible arrivait par une fente large de 0^{m},027, et dont la longueur occupait la largeur du four. L'air pour la combustion du gaz était pris dans le porte-vent du fourneau, et arrivait dans une caisse en tôle placée immédiatement à l'arrière de la fente, et qui lançait l'air par un grand nombre de trous sur toute sa longueur. La combustion du gaz était complète à 0^{m},10 ou 0^{m},15 en avant de la fente.

Nous avons essayé d'abord de produire un gaz combustible en n'employant que de la vapeur d'eau et du charbon. Dans la cheminée du four à puddler, on avait placé un cy-

lindre vertical en fonte de $2^m,50$ de hauteur sur $0^m,25$ de diamètre, qui communiquait par sa base inférieure avec la fente destinée à la sortie du gaz, au moyen d'un conduit en briques ménagé dans la maçonnerie. Le haut du cylindre était disposé de manière à pouvoir y introduire à volonté du charbon, de l'eau liquide en filet ou de la vapeur d'eau.

Le cylindre étant rempli de charbon, on a commencé par le faire rougir en brûlant du bois sur la sole du petit four, puis on introduisait l'eau en même temps qu'on donnait un peu d'air dans la caisse à vent.

Lorsqu'on introduisait de l'eau en filet mince, on obtenait immédiatement un assez fort courant de gaz inflammable, mais la proportion en diminuait progressivement, bien que la quantité d'eau introduite restât la même. Il passait évidemment, à travers le cylindre, une grande quantité d'eau non décomposée.

En substituant à l'eau liquide de la vapeur à la température de 100 degrés, on obtenait dans les premiers instants un dégagement très-abondant de gaz inflammable qui produisait une flamme intense devant la caisse à vent; mais bientôt le courant diminuait d'intensité et le gaz s'éteignait spontanément après quelques minutes, bien que le cylindre de fonte restât constamment rouge.

L'explication de ces faits me semble résulter des indications que j'ai données plus haut sur l'action calorifique produite par la décomposition de la vapeur d'eau au contact du charbon; il y a absorption d'une grande quantité de chaleur latente, et par conséquent refroidissement du charbon et du vase dans lequel on opère. Dans les expériences que je viens de citer, il est évident que la quantité de chaleur rendue latente par la décomposition de la vapeur d'eau n'était pas restituée assez promptement au charbon en raison du peu de conductibilité de cette matière et du cylindre en fonte. La proportion de chaleur rendue latente

est plus du tiers de celle développée par la combustion du gaz produit (1).

En lançant sur le charbon de la vapeur d'eau, préalablement chauffée dans des tuyaux jusqu'à 400 et 500 degrés, et en augmentant la longueur de la colonne de charbon traversée, on serait peut-être arrivé à des résultats satisfaisants.

Nous avons ensuite cherché à utiliser le gaz produit par la réaction de l'air sur le charbon en excès. Nous n'avions pas pu disposer l'appareil de combustion comme l'indique la figure placée plus haut (p. 452); le générateur était placé à l'arrière du four, et le mélange d'oxyde de carbone et d'azote produit dans cet appareil traversait le cylindre en fonte placé dans la cheminée du four à puddler, pour arriver à l'orifice de sortie. L'air destiné à la production du gaz arrivait directement dans le cendrier, et pénétrait dans le générateur par une fente latérale qui servait aussi au passage des cendres du combustible.

Nous avons commencé par charger du charbon de bois dans le générateur, puis de la braise, et on a fini par l'alimenter uniquement avec du fraisil de halle et de la poussière de charbon. Dans tous les cas, on a produit constamment la quantité de gaz nécessaire pour porter au blanc la température du four à réverbère et pour y fondre la fonte. Quand on employait du fraisil chargé de matières terreuses, il fallait arrêter le vent de temps en temps pour nettoyer la fente placée au bas du générateur, qui s'obstruait par des scories et qui ne laissait plus passer assez d'air.

En faisant arriver à la fois dans le cendrier du générateur de l'air et de la vapeur d'eau, on produit, comme

(1) $1^k,08$ de charbon produisent 7,858 unités de chaleur par leur combustion dans l'air; par l'action de la vapeur d'eau, ils donnent 2 mètres cubes d'oxyde de carbone et 2 mètres cubes d'hydrogène, dont la combustion totale produit 12,520 unités de chaleur. Il y aura donc absorption de 4,662 unités de chaleur dans la décomposition de la vapeur d'eau correspondante à $1^k,08$ de charbon.

dans les cas précédents, un courant de gaz suffisant pour maintenir au blanc le petit four à puddler. Les cendres du combustible ne fondent plus, et arrivent beaucoup plus facilement dans le cendrier.

Le temps ne m'a pas permis de continuer ces essais et d'en comparer les résultats économiques. Ceux que je viens de décrire ont été faits à la hâte; le petit four à puddler et tous les appareils nécessaires ont été établis en deux jours. Il serait, je pense, très-facile de monter un four d'essai, où l'on éviterait les inconvénients que j'ai indiqués et qui tiennent à la rapidité avec laquelle ces essais ont été faits. Je crois cependant pouvoir en tirer cette conséquence : avec toute espèce de combustibles, même avec ceux très-chargés de matières terreuses, on peut arriver à produire, par l'emploi simultané de l'air et de la vapeur d'eau, un gaz dont la combustion par de l'air chaud donnera les températures les plus élevées dont on ait besoin dans la métallurgie du fer.

Les anthracites comme les houilles sèches et terreuses seraient brûlées avec avantage par ce procédé : dans ce dernier cas, on brûlerait avec l'oxyde de carbone et l'hydrogène provenant de la base du générateur toutes les matières volatiles que dégagent les houilles à la distillation.

Les indications que je viens de présenter sont, sans doute, encore fort incomplètes. J'espère pourtant qu'elles pourront être de quelque utilité aux maîtres de forges en les engageant à répéter et à varier ces essais sur un sujet qui me paraît d'une grande importance pour les progrès futurs de leur industrie.

Emploi des gaz des hauts fourneaux au coke.

On n'a commencé que depuis peu d'années à utiliser les flammes perdues des hauts fourneaux au coke. Le bas prix du combustible employé dans la fabrication du fer à l'anglaise est sans doute la principale cause du retard qu'on a

mis à utiliser cette source de chaleur. On s'en sert maint nant dans quelques usines pour le chauffage des chaudièr à vapeur qui font mouvoir les souffleries, et je dois rappel à cette occasion que le chauffage des chaudières à vape était au nombre des usages des flammes perdues des hau fourneaux énumérés par M. Berthier dans l'important M moire qu'il a publié en 1814 dans le *Journal des Mines* s la découverte de M. Aubertot.

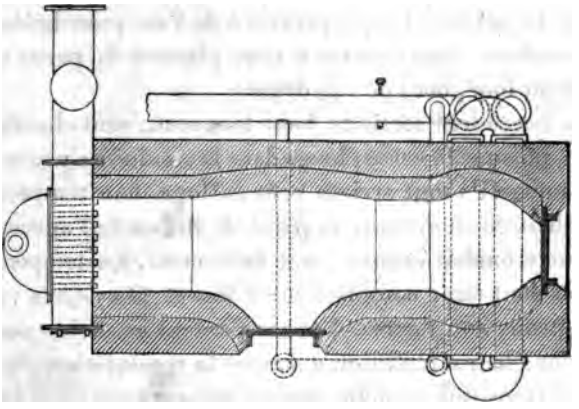
Les conséquences naturelles du travail de M. Auberto ne se sont développées qu'avec lenteur, et c'est seulemen depuis quinze ans environ qu'elles ont acquis une véritabl importance. Aujourd'hui l'opinion publique est préoccupé surtout de l'emploi des gaz des hauts fourneaux pour l'affi nage de la fonte. On ne peut pas sérieusement contester en France à M. Faber Dufaur l'honneur qu'on lui accorde dan toute l'Europe, d'avoir réalisé le premier cet importan progrès dans l'art des forges (1). Ses procédés sont employés régulièrement aujourd'hui dans plusieurs usine françaises et étrangères, mais aucune application n'en avai été faite jusqu'ici au gaz des hauts fourneaux au coke M. Victor Frèrejean vient de combler cette lacune et d'ap pliquer avec beaucoup de succès la chaleur produite par l combustion des gaz de son haut fourneau à l'alimentatio d'un four à réverbère de mazerie.

Le gaz est pris dans le haut fourneau à $3^m,60$ du gueu lard, à l'aide de plusieurs ouvertures pratiquées sur l pourtour de la cuve et qui communiquent les unes avec le autres par un système de conduits rectangulaires entre eux, de telle sorte qu'on puisse les nettoyer facilement. Le gaz

(1) Les dates citées par M. Delesse, dans l'excellente description qu'il a donnée des procédés de M. Faber Dufaur (*Annales des Mines*, 4e série, t. I, p. 433), prouvent que les premiers essais de ce célèbre métallurgiste datent de 1837. En 1840, les résultats pratiques qu'il avait obtenus étaient déjà connus de presque tous les métallurgistes et d'un grand nombre de maîtres de forges.

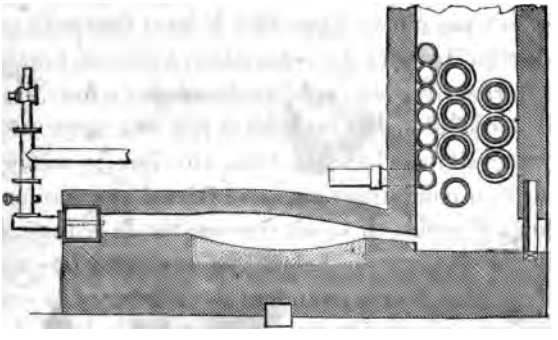
est amené sur le sol de l'usine par une conduite en tôle de $0^m,40$ de diamètre.

Fig. 1.



Le four à gaz est construit comme l'indique la figure ci-jointe représentée à l'échelle de $0^m,015$ pour mètre, en plan *fig.* 1, et en coupe verticale et longitudinale *fig.* 2. Sa disposition diffère peu de celle des fours de Vasseralfingen, dont la description a été donnée par M. Delesse.

Fig. 2.



Le vent chaud pour la combustion des gaz est fourni par sept buses en tôle de $0^m,041$ de diamètre. A la suite du four, dans la cheminée, il y a deux appareils à air chaud : l'un

qui sert pour le haut fourneau, l'autre pour le four à gaz. La température de l'air pour le haut fourneau était de 185 degrés à sa sortie de l'appareil, et seulement de 126 degrés à la tuyère. La température de l'air pour brûler les gaz, mesurée sur la caisse à vent placée à la partie antérieure du four, était de 140 degrés.

Les gaz, à leur sortie du haut fourneau, sont chauffés au rouge, puisque le verre plongé dans la conduite s'y ramollit; mais lorsqu'ils sont arrivés près du four, leur température s'est abaissée au-dessous du point de fusion de l'antimoine. Le zinc y fondait encore assez facilement. La température des gaz était donc comprise entre 360 et 432 degrés : nous admettrons 400 degrés. Les gaz perdent au moins 200 degrés dans leur circulation à travers la conduite en tôle.

La disposition actuelle du four présente quelques inconvénients : 1° on devrait pouvoir chauffer l'air pour la combustion des gaz à une température plus élevée que celle qu'on obtient, et arriver à 250 ou 300 degrés; 2° il n'est pas convenable de faire dépendre l'appareil à air chaud du haut fourneau du roulement du four à gaz, à moins d'avoir, comme M. Frèrejean se propose de le faire, deux fours pouvant marcher indépendamment l'un de l'autre, afin que l'on ne soit pas obligé de souffler le haut fourneau au vent froid, lorsqu'il y aura des réparations à faire au four; 3° au lieu de faire arriver le gaz par un des côtés du four, il serait, je crois, préférable de l'introduire par une ouverture dont le centre serait dans l'axe du four, afin que le mélange du gaz et de l'air comburant puisse se faire d'une manière plus uniforme; 4° enfin, il serait convenable de réduire autant que possible la perte de chaleur qu'éprouvent les gaz en se rendant du haut fourneau au four, en entourant la conduite en tôle d'une enveloppe peu conductrice de la chaleur ou d'une maçonnerie.

Malgré ces imperfections dans la construction du four qui a été considéré comme un simple four d'essai, on a

réussi, sans aucune difficulté, à mazer la fonte. On fond dans le four 400 kilogrammes de fonte en six ou sept quarts d'heure; pendant le dernier quart, on brasse la matière fondue avec des battitures, dont on jette deux ou trois pelletées sur la sole, et l'on y projette en même temps de l'air par la tuyère latérale pendant 10 à 20 minutes, suivant la nature de la fonte; puis on fait la coulée. Le trou de coulée se trouve immédiatement au-dessous de la porte du four. Il est fermé avec un tampon d'argile dans l'intervalle de deux coulées.

En 21 jours d'octobre et de novembre 1843, on a obtenu dans le four à gaz 77,744 kilogrammes de fonte mazée, avec un déchet de 6 à 7 pour 100. Les fontes sur lesquelles on a opéré étaient des fontes très-grises.

Les résultats obtenus par M. Frèrejean sont d'une grande importance pour les usines au coke, puisqu'ils prouvent qu'on peut non-seulement économiser le combustible employé jusqu'ici pour le mazéage de la fonte, mais encore réduire à 6 ou 7 pour 100 le déchet qui s'élève à 13 ou 14 dans les fineries à l'anglaise.

En examinant la composition des gaz qu'on brûle dans le four, composition que donnent les expériences (20) et (21) relatées p. 348, on se rend facilement raison de la haute température à laquelle on arrive par leur combustion, puisqu'ils contiennent près de 37 pour 100 de gaz combustibles, oxyde de carbone et hydrogène, proportion beaucoup plus considérable que celle contenue dans les gaz des fourneaux au charbon de bois, à la même hauteur dans la cuve.

La mise en feu du four à gaz pendant le dernier roulement du fourneau (1843) n'a amené aucun changement dans sa bonne allure. On peut donc en conclure que la soustraction du gaz à cette hauteur dans la cuve n'est pas nuisible au roulement du fourneau.

Cette conclusion est opposée à celle que j'avais présentée pour les hauts fourneaux au charbon de bois d'Audincourt

et de Clerval, mais il est facile d'indiquer la raison de c
différence. Dans les fourneaux au coke, la quantité de c
bone, comparée à la quantité de fonte obtenue, étant d
fois plus considérable que dans les fourneaux au char
de bois, la proportion des gaz qui traversent le haut fo
neau est, toutes choses égales d'ailleurs, deux fois p
considérable dans un cas que dans l'autre. En soustraya
à partir du grand ventre, dans un fourneau au coke, la m
tié des gaz de la colonne ascendante, il en restera dans
cuve, par rapport à un même poids de minerai, tout aut
que dans un fourneau au charbon de bois. La compositi
chimique des gaz à la base de la cuve est, comme on l'a v
la même avec les deux combustibles, et leur chaleur prop
est plus grande avec le coke qu'avec le charbon de boi
Dans le cas de soustraction de la moitié du courant, à
base de la cuve, il est donc évident que l'échauffement et
réduction du minerai s'effectueraient, dans le fourneau d
coke, de la même manière que dans le fourneau au charb
de bois. Seulement les gaz, à leur sortie du fourneau pa
gueulard, seraient moins chauds et moins riches en o
de carbone que dans le cas où la soustraction n'aurai
lieu.

Je ne reviendrai pas ici sur le calcul de la tempé
de combustion des gaz qu'on brûle duns le four à g
déterminations, basées sur les mêmes données qu
que j'ai présentées plus haut au sujet des fourn
Clerval et d'Audincourt, ont été faites d'une mani
plète pour terminer mon travail sur les four
Vienne et de Pont-l'Évêque, je dois me borner à
qu'elles ont été présentées pages 376 et suivant
jouterais rien en les reproduisant aux conséqu
est possible d'en tirer et qui se trouvent accon
tous les détails désirables.

IX.

Recherches sur la production et l'emploi des gaz combustibles dans les arts métallurgiques. (Premier Mémoire.)

L'application de la chaleur produite par la combustion des gaz des hauts fourneaux à la fabrication du fer dans les fours à réverbère, a conduit naturellement à rechercher s'il n'y aurait pas avantage, dans un grand nombre de cas, à substituer la combustion d'un gaz à celle d'un solide. La solution de cette question présente de l'importance. On conçoit, en effet, qu'on puisse arriver à produire, au moyen de combustibles de mauvaise qualité, ayant peu de débouchés et de valeur, des gaz susceptibles de développer, en brûlant, des températures très-élevées ; en second lieu, la nature des procédés employés à effectuer cette combustion permettrait peut-être d'utiliser, dans l'appareil métallurgique, une plus grande proportion de la chaleur produite, et partant de réaliser une économie correspondante sur le combustible consommé.

Nous devons aux métallurgistes allemands, qui ont déjà fait faire de si grands progrès à la question de l'emploi des gaz des hauts fourneaux au travail de fer, quelques indications sur ce sujet. M. Karsten (*Handbuch der eisenhuttenkunde*, tome III, page 373) fait remarquer que la meilleure manière de brûler les combustibles dans les fours à réverbère doit consister à les transformer le plus complétement possible en oxyde de carbone, et à brûler ensuite ce gaz par de l'air chaud. M. Faber-Dufaur s'est aussi occupé de recherches à ce sujet, mais il n'a pas fait connaître jusqu'à

présent les appareils qu'il a employés et les résultats obtenus (1).

Je me suis occupé du même sujet, et j'ai déjà indiqué (page 456) quelques résultats obtenus, en 1841, à l'usine d'Audincourt, de l'emploi des menus charbons pour préparer des gaz combustibles au moyen d'un courant d'air forcé seul ou mélangé de vapeur d'eau. Ces premiers essais m'avaient conduit à cette conclusion, qu'on pourrait obtenir avec des combustibles de mauvaise qualité, tels que les houilles sèches et terreuses, et les anthracites, des gaz susceptibles de développer, en brûlant, les températures les plus élevées dont on ait besoin dans la métallurgie du fer (2).

M. le sous-secrétaire d'État des travaux publics appréciant l'utilité de recherches spéciales sur ce sujet, a affecté un crédit à leur exécution, et a bien voulu m'en confier la direction. Ce Mémoire renferme les premiers résultats obtenus pendant le temps qu'il m'a été possible de consacrer à ces essais dans le courant de l'automne dernier. Ils ont été entrepris dans l'usine d'Audincourt (Doubs) où j'ai trouvé de grandes facilités pour leur exécution. Le concours de l'habile directeur de la compagnie, M. Jean-

(1) *Voyez* le Mémoire de M. Delesse, *Annales des Mines*, 4e série, t. I, p. 474.

(2) M. Péclet, dans la deuxième édition de son *Traité de la Chaleur*, t. I, p. 281, attribue ces premiers essais à MM. Thomas et Laurens, et annonce qu'ils ont été conduits à convertir d'abord les combustibles en oxyde de carbone, pour les brûler par des procédés analogues à ceux dont ils se servent pour la combustion des gaz des hauts fourneaux. D'après les détails donnés par M. Péclet, dont l'ouvrage vient de paraître, les moyens employés par MM. Thomas et Laurens pour transformer les combustibles en gaz, me paraissent se rapprocher beaucoup de ceux que j'ai moi-même indiqués. Pour établir la priorité de mes recherches, je me contenterai de faire remarquer que mes résultats ont été consignés dans un Mémoire présenté à l'*Académie des Sciences*, le 24 janvier 1842, et inséré par extrait dans le *Compte rendu* de la séance, ainsi que dans le Rapport fait sur ce Mémoire par M. Chevreul, le 28 mars suivant, sans qu'aucune réclamation ait été adressée à ce sujet à l'Académie.

maire, ancien élève de l'École Polytechnique, dont on a eu récemment à déplorer la perte, m'a été d'une bien grande utilité et m'a permis d'ajouter quelques résultats pratiques aux données théoriques que j'avais surtout mission de recueillir.

Les expériences qui font le sujet de ce premier travail ont eu spécialement pour objet l'examen et l'emploi des gaz produits par des combustibles d'origine végétale, le charbon de bois, le bois et la tourbe. Je me suis proposé particulièrement de déterminer les conditions dans lesquelles les gaz produits sont le plus riches en principes combustibles, et l'influence des divers agents de combustion, comme l'air et la vapeur d'eau, sur la composition de ces gaz. Je décrirai successivement les appareils et les procédés employés dans chaque cas, soit pour produire le gaz, soit pour l'utiliser; enfin j'examinerai en dernier lieu quelles conséquences on peut déjà tirer de mes résultats relativement à la substitution des combustibles gazeux aux combustibles solides.

Je n'ai pas besoin d'entrer ici dans de nouveaux détails sur les procédés suivis pour recueillir et analyser les gaz produits. Ces procédés sont identiquement les mêmes que ceux que j'ai décrits précédemment et appliqués à l'examen des gaz des hauts fourneaux; ce sont ceux encore qu'on verra plus loin appliqués à l'analyse des gaz des feux d'affinerie.

Données pratiques.

Dans les premiers essais faits, en 1841, à Audincourt, le générateur de gaz que nous avions employé, et dans lequel l'air s'introduisait par une fente placée à la partie inférieure, présentait quelques inconvénients que j'avais signalés et dont le principal consistait dans l'obstruction de la voie d'air par les cendres du combustible à demi fondues. J'avais proposé, pour remplacer cet appareil, un fourneau

prismatique rectangulaire terminé à la partie inférieure par une grille qui communiquait avec une chambre à double porte dans laquelle arrivait un courant d'air forcé. J'ai renoncé à la construction de ce générateur, qui aurait exigé des frais d'établissement assez considérables : l'emploi d'une grille aurait aussi présenté des inconvénients lorsqu'on aurait eu à brûler des combustibles en menu.

Je me suis arrêté à établir comme générateur de gaz l'appareil représenté ci-dessous dont la forme intérieure est semblable à celle d'un haut fourneau. Les dimensions principales sont indiquées par le dessin qui est à l'échelle de 0,01 pour mètre : le fourneau à l'extérieur présente l'aspect d'un prisme carré en briques dont les arêtes verticales sont maintenues par des armures en fonte reliées ensemble par des plaques qui forment les deux bases du prisme.

Fig. 1.

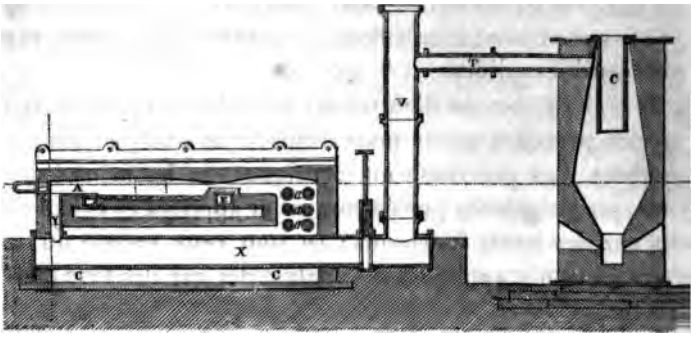
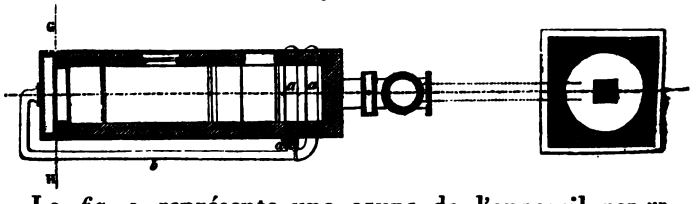


Fig. 2.

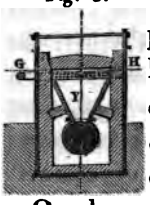


La *fig.* 1 représente une coupe de l'appareil par un plan horizontal passant par l'axe.

La *fig.* 2 donne le plan à la hauteur du ventre de la cuve.

La *fig.* 3 est une coupe en travers par un plan passant par la ligne GH de la *fig.* 2.

Fig. 3.



L'air y était lancé à la température ordinaire par deux tuyères opposées l'une à l'autre, dont la section était la même que celle des tuyères employées dans les feux d'affinerie. Le diamètre des buses était aussi le même que pour les feux d'affinerie ($0^m,025$).

On chargeait le combustible dans un cylindre en fonte C ayant le diamètre du gueulard et s'enfonçant dans la cuve de $1^m,30$; c'est entre les parois extérieures de ce cylindre et celles de la cuve que se rassemblent les gaz qui sortent par le tuyau T, pour se rendre dans le four à réverbère où leur combustion doit s'opérer. Le conduit V, tel qu'il est indiqué sur le dessin, communique avec des corps en fonte destinés à prendre le gaz du haut fourneau concurremment avec celui du générateur; mais ce dernier nous a fourni seul les gaz combustibles employés dans nos expériences. Le gaz passait ensuite dans le cylindre en fonte X, autour duquel circule la flamme du four, puis il arrive à la partie antérieure du four à réverbère par un conduit en fonte Y ayant la forme d'un tronc de pyramide quadrangulaire aplatie dont la grande base est tournée vers le haut et occupe $0^m,70$, c'est-à-dire toute la largeur du four.

L'air comburant s'échauffe à la flamme perdue du four dans une série de tuyaux *aaa*, puis se rend par le tuyau *b*, recouvert d'un lut mauvais conducteur du calorique, dans la caisse à vent S. L'air est projeté sur le gaz par deux rangées d'orifices dont chacune présente quinze ouvertures de $0^m,0135$ de diamètre. Un registre à glissoir est placé sur le tuyau vertical dont *d* est la projection et sert à régler la quantité d'air introduit. La combustion du gaz s'opère dans l'espace A, puis il passe successivement sur la sole du four,

autour des tuyaux d'air chaud *a*, et dans le four C destiné à réchauffer le gaz qui traverse le tuyau X ; il s'échappe au dehors par une cheminée qui n'est pas indiquée sur le dessin, mais dont la hauteur n'est que $2^m,59$ sur $0^m,30$ de côté à la section intérieure.

Le four à réverbère à gaz dont je viens de donner une description succincte a été exécuté sur les dessins de M. Page, ingénieur de la compagnie d'Audincourt, dont la coopération m'a été fort utile dans les essais en grand dont je vais rendre compte, Je lui en fais tous mes remercîments. Je n'insisterai pas ici sur les détails de construction du four qui est entouré de plaques de fonte, comme les fours à puddler et à réchauffer à la houille. On a scellé dans la maçonnerie du four deux prismes creux en fonte, EE, qui sont destinés à empêcher la destruction trop prompte de la partie correspondante de la sole du four; celle-ci était faite en sable siliceux.

Nous avons commencé par charger dans le générateur (1) de la petite braise formée par des fragments de charbon qui restent sur un tamis dont les mailles ont $0^m,013$ de côté, et nous avons donné le vent avec une pression de $0^m,025$ de mercure. Après six heures de feu, le four à réverbère, qui était neuf et très-humide, se trouvait chauffé au blanc. Mais le générateur était engorgé par des matières à demi fondues qui s'attachaient au-dessus des tuyères, les rendaient noires et empêchaient le passage de l'air : on a débarrassé le creuset, on l'a rempli de charbon frais, et on a fait agir le vent directement à poitrine ouverte pour réchauffer la partie inférieure du générateur et pour dissoudre les engorgements. A partir de ce moment, on a ajouté par chaque hectolitre de braise formant une charge, une quantité de fondant représentée par $0^{lit},5$ laitier de

(1) Le générateur avait été séché auparavant pendant quelques jours au moyen d'un feu de charbon allumé dans le creuset, la poitrine étant ouverte.

haut fourneau, $0^{lit},5$ scories de forges, et $0^{lit},5$ d'argile ferrugineuse. Cette addition de fondants a parfaitement réussi, et la marche du générateur n'a pas cessé de présenter, à partir de ce moment, une régularité parfaite; le laitier s'écoulait, comme dans un haut fourneau, par une ouverture ménagée entre la tympe et la dame. Il était d'une assez grande liquidité, mais pas assez basique pour corroder les parois intérieures en briques réfractaires du générateur.

Le roulement de l'appareil a été arrêté pendant deux jours pour une réparation à la voûte du four à réverbère, puis on a remis en feu. Quatre heures après la mise en feu, le four se trouve chauffé au blanc soudant et s'y maintient pendant plusieurs heures jusqu'au moment où l'on arrête le vent. On a soudé au marteau plusieurs barreaux; mais l'usine n'étant pas encore disposée pour une fabrication courante au moyen de l'appareil, on a dû se borner à constater qu'il marchait avec régularité, et qu'il permettait d'obtenir facilement la température du blanc soudant. Les deux lopins provenant du forgeage au marteau de la loupe qu'on retire du feu d'affinerie et complétement refroidis, arrivent au blanc soudant au bout d'une heure d'exposition sur la sole.

Pendant les essais précédents, on brûlait par heure, dans le générateur, 3 hectolitres de braise pesant 54 kilogrammes, avec une pression de $0^{m},03$ de mercure sur le porte-vent. La température des gaz, à leur entrée dans le tuyau de fonte T, était suffisante pour produire la fusion de l'antimoine, c'est-à-dire 432 degrés. Mais, à l'extrémité du conduit TV, cette température, mesurée avec un thermomètre à mercure, a été trouvée de 310 degrés. Après le réchauffage dans le conduit X, cette température suffisait pour la fusion du zinc, mais non pour celle de l'antimoine; elle était d'environ 400 degrés.

La température de l'air, mesurée à son entrée dans la

caisse S, a été trouvée comprise, dans deux expériences, lorsque le four était blanc soudant, entre 290 et 310 degrés.

Roulement au fraisil tamisé.

La braise dont on s'est servi pour alimenter le générateur dans les essais qui précèdent, provient, comme je l'ai indiqué plus haut, du cœur des meules de carbonisation et du tamisage des résidus de halle à travers un tamis dont les mailles ont $0^m,013$ de côté. On estime la valeur de la braise à la moitié de celle du charbon. Tout ce qui passe au travers du tamis à braise est rejeté et perdu. Nous avons cherché à utiliser ces résidus qui comprennent une fraction notable du charbon brûlé à Audincourt (1). On s'est débarrassé des poussières fines par un nouveau tamisage fait sur un tamis dont les mailles avaient $0^m,006$ de côté. L'hectolitre de fraisil tamisé pèse 18 kilogrammes.

En roulant avec le nouveau combustible, on ajoutait par chaque hectolitre de fraisil les mêmes proportions de fondant qu'avec la braise. Le roulement du générateur et celui du four à gaz ont été exactement les mêmes que dans les expériences qui précèdent. On a porté à $0^m,035$ de mercure la pression de l'air au générateur. Le four étant tou[illegible] à fait froid, il a fallu 4^h de marche pour le porter au blanc soudant, et on l'y a maintenu pendant 4^h consécutive[illegible] sans qu'il soit survenu la moindre variation dans. so[illegible] allure. On a soudé des lopins et plusieurs barreaux. L[illegible] consommation en fraisil tamisé pendant les 8^h a été d[illegible] 26 hectolitres, soit par heure $3^{hect},25$ pesant 58 kilogrammes.

Cet essai a été répété deux jours après et a produit le[illegible]s

(1) D'après M. Page, il y a environ 1 de braise et fraisil produit pour 9 de charbon, et ce dixième se compose de 6 de braise, 2 de fraisil tamisé et 2 de poussières.

mêmes résultats. Lorsqu'on veut arrêter le feu, on débarrasse le creuset du générateur pour empêcher le laitier de s'y coaguler, on tasse du fraisil entre la tympe et la dame, et l'on bouche les tuyères. En ne laissant que trois ou quatre jours d'intervalle entre la suspension et la reprise, il n'y a pas le moindre dérangement dans l'allure du générateur.

Analyse des gaz combustibles. — On les a aspirés au moyen d'un trou ménagé à la partie inférieure du tuyau V. Trois expériences ont fourni les données suivantes :

		(1)	(2)	(3)
Gaz pour l'analyse		$1^{lit},570$	$1^{lit},565$	$1^{lit},590$
Baromètre		$0^{m},740$	$0^{m},736$	$0^{m},739$
Thermomètre		14°	15°	15°
Gaz ramené à 0° et à $0^{m},760$		$1^{lit},451$	$1^{lit},436$	$1^{lit},465$
		gr	gr	gr
Acide carbonique		0,013	0,017	0,014
Produits de la combustion.	Eau	0,030	0,050	0,018
	Acide carbonique.	0,967	0,931	0,972
	Oxygène absorbé.	0,368	0,369	0,365
Dosage direct de l'azote		63,5	62,0	63,1

Ces nombres conduisent aux résultats suivants :

	(1)	(2)	(3)
Acide carbonique	0,45	0,59	0,50
Oxyde de carbone	33,63	32,74	33,51
Hydrogène	2,55	4,29	1,52
Azote	63,37	62,38	64,47
	100,00	100,00	100,00
Oxygène p. 100 vol. d'azote.	27,2	27,2	26,7

(1) et (2) Gaz pris pendant le roulement à la braise, la température du four étant celle du blanc soudant.

(3) Gaz aspiré pendant le roulement au fraisil tamisé, trois heures après la remise en feu.

J'ai fait une expérience particulière pour déterminer la proportion de vapeur d'eau entraînée par le gaz, en le faisant passer pendant l'aspiration à travers un tube à

ponce sulfurique : pour un litre de gaz sec ramené à o degré et à $0^m,760$ de pression, je n'ai obtenu que $0^{gr},004$ d'eau, ou environ 0,5 pour 100 volumes de gaz sec. Ce résultat prouve que la presque totalité de l'eau hygrométrique du charbon s'échappe au dehors par suite de l'échauffement du cylindre chargeur au moyen de l'atmosphère gazeuse qui l'entoure. On remarquait effectivement qu'il sortait de ce cylindre une fumée blanche qui déposait de l'eau sur les corps froids.

Les analyses précédentes montrent que l'oxygène de l'air injecté se change complétement dans le générateur à gaz en oxyde de carbone. L'hydrogène provient de la distillation du charbon et de la réaction de la vapeur d'eau contenue dans l'air sur le charbon incandescent. La proportion en est notablement plus forte avec la braise qu'avec le fraisil, et cette circonstance tient sans doute à ce que le charbon le plus menu est celui qui a été soumis dans les meules à la température la plus élevée. La petite quantité d'acide carbonique que contient le gaz provient sans doute de la distillation du charbon ou de la décomposition de la pierraille calcaire qui s'y trouve mélangée en petite proportion.

Analyse des gaz après leur combustion dans le four à réverbère. — J'ai cherché à déterminer, dans les deux expériences suivantes, de quelle manière s'opère la combustion dans les fours. Le gaz brûlé a été aspiré par l'ouvreau ménagé dans la porte de travail au moyen d'un canon de fusil garni intérieurement d'un tube de porcelaine et préparé comme je l'ai indiqué précédemment. Il n'y avait pas de fer dans le four au moment de l'aspiration des gaz. Les deux expériences ont fourni les données suivantes :

	(4)	(5)
Gaz pour l'analyse.....	$1^{lit},565$	$1^{lit},580$
Baromètre.....	$0^m,736$	$0^m,734$
Thermomètre.....	11°	$11^o,8$
Gaz ramené à 0° et à $0^m,760$.....	$1^{lit},456$	$1^{lit},444$

		gr	gr
Acide carbonique		0,487	0,478
Produits de la combustion.	Eau	»	0,005
	Acide carbonique	0,013	0,165
	Oxygène	0,050	0,060
Dosage direct de l'azote		79,8	

qui conduisent aux résultats suivants :

	(4)	(5)
Acide carbonique	16,89	16,71
Oxyde de carbone	0,45	5,77
Hydrogène	»	0,42
Oxygène libre	2,63	»
Azote	80,03	77,10
	100,00	100,00

(4) Pendant l'aspiration, la flamme qui sort par l'ouverture de la première partie du four est jaunâtre et courte. Il ne sort pas de flamme par la deuxième porte.

(5) La flamme qui sort par l'ouverture de la porte est longue et présente une couleur bleue très-prononcée. Entre la deuxième porte du four et les platines en fonte il sort des flammes bleues abondantes.

Dans les deux expériences qui précèdent, j'ai cherché, en réglant la quantité d'air comburant, à produire les deux limites extrêmes que présente la combustion dans les fours à gaz. Il ne faut que très-peu d'habitude pour reconnaître, à l'aspect de la flamme qui sort du four en vertu de l'excédant de pression, s'il y a excès d'air ou excès de gaz combustibles, et, dans les deux cas, on s'aperçoit bien vite que la température s'abaisse. Les différences dans la composition de l'atmosphère des fours, telles qu'elles sont indiquées dans les analyses (4) et (5), correspondent à des apparences parfaitement distinctes dans son allure, et il est facile de régler le volume de l'air, de façon à pouvoir se trouver à peu près à égale distance des deux limites extrêmes que ces analyses représentent, et à obtenir ainsi le maximum de température dépendant de la composition des

gaz, de leur chaleur propre et de celle de l'air comburant.

Les résultats qui ont été obtenus de l'emploi de la braise et du fraisil tamisé, me paraissent tout à fait concluants, et mettent, je crois, hors de doute la possibilité d'employer ces combustibles au travail du fer en les brûlant au moyen des appareils que j'ai indiqués, et qui suffisent déjà pour obtenir un roulement régulier et continu. Les dimensions et la forme intérieure du générateur éprouveront vraisemblablement des modifications, et il en est quelques-unes que l'expérience peut déjà me faire considérer comme convenables, et que je vais indiquer successivement.

Dans le générateur (*fig.* 1), les gaz s'échappent par le tuyau T en vertu de la résistance qu'ils éprouvent à traverser le combustible menu qui remplit le cylindre chargeur. Ils se réunissent avant de s'échapper par le tuyau T dans l'espace annulaire compris entre le cylindre et la paroi de la cuve. Il est convenable de diminuer autant que possible leur vitesse dans cet espace afin d'éviter l'entraînement des poussières dans les tuyaux et jusque sur la sole du four à gaz. On y arrivera en évasant de suite beaucoup la cuve à partir du sommet, et en rendant ensuite ses parois à peu près cylindriques. On pourra porter le diamètre au ventre à $1^{m},50$, ce qui augmentera beaucoup la capacité du générateur. Une caisse en fonte d'une assez grande capacité, placée au bas du tuyau V, produirait aussi la précipitation des poussières en diminuant la vitesse des gaz.

Il conviendra d'augmenter l'épaisseur de la maçonnerie en briques du générateur, afin de diminuer la perte de chaleur qui s'opère par le rayonnement de la surface extérieure et qui devient sensible après huit ou dix heures de roulement. Enfin on devra placer au-dessus du générateur une cheminée ouverte sur le devant et analogue à celle qui surmonte le gueulard des hauts fourneaux, afin d'entraîner au dehors la petite quantité de gaz qui sort du cylindre en fonte, surtout au moment de la charge. Comme ce gaz ren-

fermait une proportion considérable d'oxyde de carbone, il incommodait très-promptement les ouvriers chargeurs qui ne prenaient pas de précautions pour s'en garantir. Nous savons, en effet, par les expériences de M. Leblanc, que les asphyxies par la vapeur du charbon doivent être attribuées à l'action de l'oxyde de carbone sur l'économie.

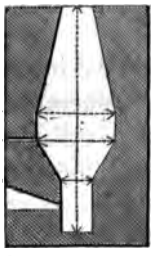
Nous avons essayé en dernier lieu de brûler dans le générateur le fraisil non tamisé, tel qu'on le ramasse sur les halles et sur les aires de carbonisation. On employait la même quantité de fondant qu'avec la braise. Le four à réverbère s'est échauffé aussi rapidement et au même degré que dans les cas précédents. Seulement, les gaz entraînaient une quantité notable de poussière de charbon qui produisait des étincelles au contact de l'air. La pression du vent au générateur a été portée à $0^m,04$ de mercure.

Les expériences avec le fraisil non tamisé ont été interrompues par une explosion qui eut lieu dans le générateur et projeta au dehors le fraisil qui remplissait le cylindre chargeur. Comme cet appareil fonctionnait dans l'intérieur de l'usine, on n'a pas continué ces expériences de crainte d'incendie. Cette projection de fraisil au dehors est due bien certainement à la grande quantité d'humidité contenue dans le charbon employé qui avait été ramassé au dehors par un temps pluvieux. Il s'est développé dans le cylindre chargeur une grande quantité de vapeur qui n'a pu se dégager librement au dehors par l'obstacle que lui opposait le fraisil tassé, et qui a fini par produire une explosion. Celle-ci n'a eu du reste aucune conséquence grave. Avec du fraisil bien sec et un générateur recouvert d'une cheminée assez élevée, je crois qu'on pourrait sans aucun danger recommencer ces expériences sur le fraisil non tamisé, mais en faisant circuler les gaz dans les réservoirs, afin de condenser les poussières (1).

(1) On pourrait employer aussi un régulateur à eau semblable à celui établi par MM. Thomas et Laurens, et qui se trouve décrit par MM. Flachat et

Depuis mon départ d'Audincourt, M. Page a fait établir un générateur disposé d'une manière peu différente de celui que j'ai décrit, et qui sert à chauffer un four de tôlerie. On n'emploie que du fraisil non tamisé. L'appareil fonctionne très-régulièrement et permet d'obtenir une température bien constante, ce qui est presque impossible dans les fours alimentés avec la flamme perdue des foyers d'affinerie. Toutes les fois que l'on a employé du fraisil mouillé, on a eu des explosions, et celles-ci ne se sont jamais produites avec du fraisil recueilli par un temps sec. Je n'ai pas, du reste, de renseignements plus précis sur la consommation et *le roulement* de l'appareil.

Données théoriques.



Les expériences décrites jusqu'ici ont été les seules où l'on ait pu comparer les données théoriques obtenues par l'analyse des gaz avec les résultats de la pratique. Toutes les expériences qui suivent ont été faites sur des fourneaux d'essai dont les dimensions et le mode de roulement sont comparables à ceux du générateur décrit plus haut, mais je me suis borné à l'analyse des gaz produits sans chercher à déterminer directement leurs effets calorifiques.

Un des générateurs de gaz que j'ai employés est représenté dans la figure ci-dessus; c'est un fourneau à une seule tuyère. Voici ses principales dimensions :

	m
Largeur au guculard	0,20
Largeur au ventre	0,50
Largeur devant la tuyère	0,20
Hauteur de la cuve	0,70
Hauteur totale	1,60

Petiet (*Traité de la fabrication du fer*, t. I, p. 404). Le seul inconvénient de son emploi serait d'absorber la chaleur sensible des gaz, qui est considérable lorsqu'on brûle le charbon par de l'air seulement.

Le vide intérieur du fourneau se compose de parties prismatiques et pyramidales qui présentent toutes un carré pour section horizontale. La buse par laquelle arrivait l'air avait $0^m,005$ de diamètre, et la pression variait entre $0^m,030$ et $0^m,035$ de mercure.

Cet appareil a servi à produire des gaz combustibles :

1°. Au moyen de l'action simultanée de l'air et de la vapeur d'eau sur le charbon ;

2°. Au moyen du bois simplement desséché à l'air ;

3°. Au moyen de la tourbe.

Je vais indiquer successivement les résultats obtenus dans ces trois séries d'expériences.

Gaz obtenus par l'air et la vapeur d'eau.

On a disposé deux buses dans la tuyère du générateur : l'une qui servait à l'introduction de l'air et dont j'ai donné tout à l'heure le diamètre ; l'autre par laquelle on faisait arriver de la vapeur d'eau et dont le diamètre était également de $0^m,005$. La vapeur était fournie par un cylindre en fonte de $0^m,22$ de diamètre intérieur, sur $1^m,30$ de hauteur, placé verticalement au-dessus d'un petit foyer de chauffage. L'eau d'alimentation était introduite par un tube en siphon, muni d'un entonnoir à sa partie supérieure. La vapeur s'échappait par un tuyau en cuivre qui se recourbait plusieurs fois sur lui-même dans un petit four disposé au-dessus de l'orifice de sortie des gaz, de façon à pouvoir chauffer cette vapeur avant de la lancer dans le fourneau. Un robinet placé sur le tuyau permettait de régler convenablement l'introduction de la vapeur dont la pression dans le cylindre producteur n'était supérieure à la pression atmosphérique que de $0^m,025$ de mercure.

Pendant toute la durée des expériences faites avec l'air et la vapeur d'eau, on n'a chargé que du charbon de bois dans le générateur.

En lançant dans le fourneau de l'air seulement à la

température ordinaire, la tuyère est d'un blanc éblouissant ; les gaz s'enflamment à leur sortie du générateur et produisent une flamme bleue avec quelques reflets rougeâtres. Leur température propre est suffisante pour déterminer la fusion de l'antimoine, mais seulement après six ou huit heures de feu, temps nécessaire pour permettre à la maçonnerie du petit fourneau de s'échauffer.

Lorsqu'on introduit la vapeur, la tuyère devient immédiatement rouge de blanche qu'elle était auparavant. La température de la vapeur près de la tuyère était comprise entre 200 et 250 degrés. Si la quantité en est un peu considérable, la flamme du générateur est nuancée de rouge. La température propre du courant de gaz s'abaisse. L'étain y fond encore, mais le plomb n'y fond plus, et en essayant la température avec un thermomètre à mercure, j'ai trouvé 240 degrés environ. Tous ces essais, de même que les prises du gaz analysé, ont eu lieu au moment où les proportions respectives d'air et de vapeur demeuraient constantes, ce que l'on reconnaissait à la pression sur les buses et à la régularité dans l'allure du générateur. Ce résultat prouve déjà un abaissement considérable dans la température des gaz à leur sortie lorsqu'on emploie la vapeur. L'aspect de la tuyère et l'expérience suivante montrent également l'absorption de chaleur qui se produit dans le bas du fourneau. On a chargé, pendant quelques heures, par 5 kilogrammes de charbon, 1 kilogramme scories de forges bien coulantes ; avec l'emploi simultané de l'air et de la vapeur, ces scories ne sont devenues que pâteuses, et il fallait les tirer hors du creuset avec le ringard : en supprimant la vapeur, la tuyère redevient blanche et les scories sont bientôt extrêmement liquides.

On brûlait moyennement dans le générateur 0^{hect},40 de charbon par heure.

L'analyse des gaz produits, soit avec l'air seulement, soit avec l'air et la vapeur employés ensemble, a été faite au

moyen des données des trois expériences suivantes :

		(6)	(7)	(8)
Gaz		$1^{lit},580$	$1^{lit},515$	$1^{lit},560$
Baromètre		$0^{m},736$	$0^{m},738$	$0^{m},741$
Thermomètre		14°	13°	11°
Gaz ramené à 0° et à $0^{m},760$		$1^{lit},455$	$1^{lit},404$	$1^{lit},462$
Acide carbonique		gr 0,012	gr 0,157	gr 0,159
Produits de la combustion.	Eau	0,052	0,162	0,161
	Acide carbonique	0,952	0,768	0,773
	Oxygène absorbé	0,389	0,414	»

Ces nombres donnent les résultats qui suivent :

	(6)	(7)	(8)	Moyenne de (7) et (8).
Acide carbonique	0,41	5,65	5,49	5,5
Oxyde de carbone	33,04	27,62	26,70	27,2
Hydrogène	4,43	14,29	13,65	14,0
Azote	62,12	52,44	54,16	53,2
	100,00	100,00	100,00	100,0

(6). Le gaz correspond au roulement avec l'air seul. Sa composition ne diffère des résultats des analyses (1), (2), (3), que par une proportion un peu plus considérable d'hydrogène.

(7), (8). Gaz aspiré pendant le roulement avec l'air et la vapeur; la température de la vapeur près de la tuyère est d'environ 250 degrés; l'œil de la tuyère est rouge.

La proportion de vapeur d'eau correspondante à 100 volumes de gaz sec a été trouvée dans trois expériences faites immédiatement après la prise des gaz :

	(6)	(7)	(8)
Vapeur d'eau pour 100 volumes de gaz sec	1,2	3,4	3,2

Les résultats qui précèdent établissent déjà que la décomposition de la vapeur par le charbon s'est constamment opérée dans mes expériences, de façon à produire de l'hydrogène et de l'acide carbonique sans oxyde de carbone.

On peut s'assurer, en effet, que les proportions d'oxyde de carbone et d'azote sont entre elles dans le rapport de 52,52 à 100, comme cela arrive pour le gaz provenant de l'action de l'air sur du carbone pur et en excès. Si l'on déduit de l'hydrogène total celui qui correspond au carbone dans l'expérience (6), et qui provient de la distillation du charbon, on trouve que le reste représente précisément le double de l'acide carbonique produit, comme cela doit arriver si la vapeur d'eau se décompose de la manière indiquée. Je reviendrai sur ce résultat, qui est bien d'accord avec ceux que j'ai obtenus dans l'analyse des gaz des hauts fourneaux, en comparant l'action réductive de l'oxyde de carbone avec celle de l'hydrogène.

On peut calculer, d'après les résultats des analyses, le volume de la vapeur d'eau introduite dans le générateur. Il correspond, par chaque litre de gaz, à deux fois le volume de l'acide carbonique, plus la vapeur non décomposée, c'est-à-dire à

$$\frac{2 \times 5,57 + 3,3}{100} = \frac{14,14}{100}.$$

La quantité d'air correspondante à un litre de gaz :

$$= \frac{53,3}{79,2} = 0^{\text{lit}},67.$$

Les volumes d'air et de vapeur d'eau sont donc entre eux :: 1 : 0,215 dans le roulement qui correspond aux analyses (7) et (8).

L'effet calorifique produit par l'introduction de la vapeur d'eau dans le générateur est parfaitement tranché et vient confirmer les déductions que j'avais tirées des expériences de Dulong sur les chaleurs de combustion (p. 334). Je reviendrai sur ce sujet à la fin du Mémoire. On verra que les résultats obtenus sont différents lorsque les proportions respectives des gaz hydrogène et oxyde de carbone résultant de la réduction viennent à varier.

Gaz produits par le bois en nature.

Le bois employé est du gros rondin flotté, puis exposé à l'air depuis huit mois : il se compose d'environ 0,75 d'essences dures, et le reste en bois blanc. On l'a scié en bouts de $0^m,12$ de longueur. On en chargeait à la fois dans le générateur 8 kilogrammes, et chaque charge descendait en 18 ou 20 minutes. On a commencé par introduire huit charges ou deux hectolitres pour remplir le fourneau, et l'on a donné le vent avec une pression de 2 centimètres de mercure; l'air était froid : les gaz qui sortent du générateur produisent à l'air une flamme blanche très-volumineuse. La tuyère est d'un blanc éclatant, et on n'y aperçoit pas de morceaux de bois en nature. On n'a pas eu besoin d'ajouter de fondants. La température propre du courant de gaz qui sort du générateur est très-peu élevée. L'étain n'y fond pas, et une détermination de température, faite après dix heures de roulement continu, en plaçant au milieu du courant un thermomètre à mercure entouré d'un étui métallique, m'a donné 125 degrés.

J'ai obtenu dans trois expériences les résultats suivants :

		(9)	(10)	(11)
Gaz pour l'analyse		$1^{lit},580$	$1^{lit},570$	$1^{lit},560$
Baromètre		$0^m,733$	$0^m,733$	$0^m,733$
Thermomètre		$12^o,5$	16°	$11^o,5$
Gaz ramené à 0° et à $0^m,760$		$1^{lit},454$	$1^{lit},430$	$1^{lit},443$
		gr	gr	gr
Acide carbonique		0,275	0,189	0,223
Produits de la combustion.	Eau	0,111	0,120	0,118
	Acide carbonique.	0,848	0,912	0,932
	Oxygène absorbé.	0,418	0,458	0,456
Azote dosé directement		52,5	51,6	51,3

Dans ces expériences, la perte de poids du tube à combustion indique un peu plus d'oxygène qu'il n'en faudrait si tout l'hydrogène était réellement à l'état de liberté. Ce

fait semblerait annoncer qu'il y a dans le gaz de l'hydrogène combiné avec le carbone; mais comme la proportion en serait, dans tous les cas, très-peu considérable, et comme les conclusions que j'ai à présenter sont indépendantes de la nature de ce composé, qui n'est peut-être pas du gaz des marais, je me suis borné à calculer mes expériences en admettant dans les gaz de l'hydrogène libre et de l'oxyde de carbone.

Les nombres précédents conduisent aux résultats qui suivent :

	(9)	(10)	(11)
Acide carbonique...	9,55	6,68	7,80
Oxyde de carbone ..	29,45	32,21	32,59
Hydrogène.....	9,46	10,39	10,13
Azote.....	51,54	50,72	49,48
	100,00	100,00	100,00

(9). Gaz aspiré deux heures après la mise en feu; la flamme est blanche et trouble. Il se dépose beaucoup d'eau et de goudron dans les tubes d'aspiration.

(10). Gaz pris neuf heures après la mise en feu. Flamme blanche et trouble. Dépôt d'eau acide et de goudron dans les tubes d'aspiration.

(11). Gaz aspiré douze heures après la mise en feu, dans des circonstances semblables à celles de l'expérience précédente.

La proportion des produits liquides condensés dans un tube en U pesé contenant de l'acide sulfurique, a été déterminée dans deux expériences faites après les prises de gaz (10) et (11).

	(10)	(11)
Eau écoulée.....	$1^{lit},580$	$1^{lit},410$
Différence de niveau.....	$0^{m},53$	$0^{m},550$
Gaz ramené à l'état sec, à 0° et à $0^{m},760$.	$1^{lit},360$	$1^{lit},191$
Produits liquides condensés.....	$0^{gr},602$	$0^{gr},614$

Ce qui donne :

	(10)	(11)
Produits liquides correspondant à 1 litre de gaz sec, à 0° et à $0^m,760$.....	$0^{gr},442$	$0^{gr},515$

Ces produits liquides se composent d'eau acide et de goudron ; ils paraissent identiques avec ceux obtenus dans la distillation du bois en vase clos.

Je prendrai, pour représenter la composition des gaz produits dans les expériences précédentes, la moyenne des analyses (10) et (11), faites longtemps après la mise en feu, qui donne :

Acide carbonique.....	7,23
Oxyde de carbone.....	32,40
Hydrogène.....	10,26
Azote.....	50,11
	100,00
Produits liquides sur 1 litre gaz sec.	$0^{gr},478$.

L'expérience (9), faite deux heures après la mise en feu, donne des nombres un peu différents de la moyenne précédente. Ce résultat tient probablement à l'absorption de chaleur qui avait lieu par la maçonnerie du fourneau, en sorte qu'il restait une moindre quantité de chaleur disponible pour produire la distillation.

Pour pouvoir apprécier la manière dont s'opérait la distillation du bois dans le générateur, j'avais fait placer à différentes hauteurs dans la maçonnerie, des tubes de porcelaine communiquant de l'intérieur à l'extérieur. Dans l'expérience suivante, le gaz a été aspiré par le tube placé à $0^m,45$ au-dessus de la tuyère; en l'ouvrant, le gaz est venu brûler à l'air avec une flamme bleuâtre. Il ne s'est déposé ni eau ni goudron dans le tube d'aspiration. L'analyse de ce gaz résulte des données suivantes :

Gaz pour l'analyse.....	$1^{lit},550$
Baromètre.....	$0^m,732$
Thermomètre.....	12°
Gaz ramené à 0° et à $0^m,760$....	$1^{lit},430$

		gr
Acide carbonique		0,104
Produits de la combustion.	Eau	0,021
	Acide carbonique.	0,954
Dosage direct de l'azote		63,6

Elles conduisent aux nombres qui suivent :

	(12)
Acide carbonique	0,49
Oxyde de carbone	33,70
Hydrogène	1,81
Azote	64,00
	100,00

Cette analyse prouve que l'oxygène de l'air se change complétement en oxyde de carbone avant d'arriver dans la région où le bois se distille. Cette distillation s'opère donc dans une atmosphère saturée de carbone et au moyen de la chaleur propre que conserve la colonne ascendante après la formation de l'oxyde de carbone. Si donc, nous déduisons dans la moyenne ci-dessus, l'azote et l'oxyde de carbone correspondant (52,52 pour 100 d'azote), nous trouverons pour les produits de la distillation sur 100 volumes gaz sec :

Acide carbonique	7,23	30,7
Oxyde de carbone	6,08	25,8
Hydrogène	10,26	43,5
	23,57	100,0
Produits liquides sur 1 litre	0gr,479	2gr,030

On peut calculer la proportion de charbon produite par la distillation du bois dans les expériences qui précèdent, puisque cette quantité de charbon passe à l'état d'oxyde de carbone en se combinant avec l'oxygène correspondant à 50,11 d'azote ou 13,16. Pour 1 litre de gaz sec, on a donc :

$0^{lit},2632$ oxyde de carbone contenant, carbone :				$0^{gr},1417$
Produits de la distillation sur 1 litre.	Acide carbonique.	$0^{lit},0723$	pesant	0,1431
	Oxyde de carbone.	0,0608	—	0,0756
	Hydrogène.	0,1026	—	0,0091
	Gaz.	0,2357	—	0,2278
	Produits liquides..	»	—	0,4787

En admettant que le bois renferme 1 pour 100 de cendres, nous trouverons que 100 parties de bois ont donné en poids :

Charbon et cendres.....	17,5
Gaz.....	26,6
Matières liquides.	55,9
	100,0

Ces résultats diffèrent peu de ceux obtenus par Stoltz et qui sont rapportés par M. Berthier dans son *Traité des essais par la voie sèche* (t. I, p. 243). Seulement, la proportion de charbon laissée par distillation est plus faible ici que dans les expériences de Stoltz. Cela tient probablement à ce que la distillation, s'opérant sans l'intermédiaire d'un vase et plus rapidement par conséquent que dans une cornue, devait laisser une moindre proportion de charbon; il est aussi très-probable que les bois employés dans les deux cas n'étaient pas dans le même état de siccité et n'appartenaient pas aux mêmes essences.

Les $0^{gr},1417$ de carbone correspondent à $0^{lit},1316$ de vapeur de carbone et doivent dégager, d'après Dulong, 210 unités de chaleur en se changeant en oxyde de carbone. La totalité des matières volatiles étant de $0^{gr},7065$, et leur expulsion absorbant la presque totalité de la chaleur propre de l'oxyde de carbone, on trouve que pour 1 gramme de matières volatiles, il y a eu 300 unités de chaleur employées, et que, par conséquent, la caloricité moyenne des produits de la distillation du bois ne serait qu'à peine la moitié de celle de la vapeur d'eau.

J'ai fait remarquer plus haut que la température propre du courant de gaz à sa sortie du générateur était très-peu supérieure à 100 degrés. Ce résultat, rapproché des analyses précédentes, permet d'énoncer cette conclusion :

La quantité de chaleur absorbée par la distillation du bois simplement desséché à l'air est à peu près égale à celle développée par la transformation du carbone produit par cette distillation en oxyde de carbone.

Il convient de faire remarquer cependant que la conclusion énoncée ne s'applique qu'au cas où la proportion de charbon différerait peu de celle obtenue dans les expériences qui précèdent. Pour une distillation plus lente, la proportion de charbon serait plus considérable, et probablement il y aurait moins de chaleur absorbée par les produits volatils de la distillation. Le contraire aurait lieu pour une distillation plus rapide et qui laisserait un moindre résidu de charbon.

J'ai insisté, du reste, sur la conclusion posée ci-dessus en m'occupant de la carbonisation du bois en meules. Je me contente de faire remarquer ici qu'elle explique, d'une manière bien satisfaisante, les circonstances que présente le roulement des hauts fourneaux où l'on consomme une forte proportion de bois en nature. La carbonisation de celui-ci s'opère complétement dans une zone du haut fourneau, très-peu étendue en hauteur, et dans un temps très-court, ainsi que je l'ai montré dans des expériences directes faites sur les fourneaux de Vellexon et d'Audincourt (p. 172 et 295). Cette zone se trouve placée à une certaine distance du gueulard et, dans toute la partie de la cuve qui lui est supérieure, le bois et les minerais n'éprouvent aucune espèce d'altération. La carbonisation a lieu dans une atmosphère non oxydante et dans des circonstances semblables à celles que présentait le générateur. Dans le cas où l'on n'emploierait que du bois en nature et de l'air froid, cette distillation absorberait donc la totalité de la

chaleur sensible que conserve la colonne gazeuse ascendante après la formation de l'oxyde de carbone à une petite distance de la tuyère. Il ne resterait donc plus de chaleur applicable à l'échauffement des minerais, à l'expulsion de leur eau de combinaison et de l'acide carbonique de la castine, à la fusion du métal et des gangues. Mais comme ces derniers effets se produiraient simultanément avec la distillation du bois, on conçoit que la zone où celle-ci s'opère s'abaisserait de plus en plus dans les fourneaux, dont toute la partie supérieure serait complétement refroidie. *A la limite,* on verrait le bois venir se brûler en nature devant la tuyère, et les minerais descendre du haut en bas du fourneau sans être préparés. Ce fait s'est présenté plusieurs fois. A Montagney (Doubs), en 1837, on a été obligé de vider à la pelle un haut fourneau où l'on avait fini par ne charger que du bois vert comme combustible et qui s'était entièrement refroidi.

Les changements qui se produisent dans l'allure des fourneaux par l'emploi du bois ne se font sentir qu'après un certain temps de roulement, et la raison en est facile à concevoir. Ordinairement on commence le fondage avec du charbon seul, auquel on substitue ensuite le bois progressivement. Dans le roulement au charbon, une partie de la chaleur sensible du courant de gaz sert à échauffer la maçonnerie du fourneau, et l'équilibre de température ne s'établit qu'après un temps assez long, car on sait qu'il faut des mois entiers pour qu'un fourneau arrive à sa *portée de minerai*. Si l'on substitue le bois au charbon, la cuve se trouve refroidie sur une certaine hauteur, et c'est alors l'enveloppe qui cède de la chaleur au lit de fusion, jusqu'à ce que l'équilibre se rétablisse de nouveau. On a remarqué que c'était surtout à la fin des fondages que l'emploi du bois était avantageux, sans doute parce qu'il permettait d'utiliser une partie de la chaleur perdue dans la maçonnerie du haut fourneau.

Les résultats les plus remarquables qui aient été obtenus de l'emploi du bois en nature, me paraissent être ceux du haut fourneau d'Audincourt, qui a roulé pendant plusieurs semaines en ne brûlant que du bois vert flotté (1) : on l'a essayé à la fin d'un fondage au charbon et on a fini par ne porter que du bois vert dans les charges. La température de l'air était maintenue à près de 400 degrés. A la reprise du fondage, on a recommencé à remplacer le charbon jusqu'à substitution complète par du bois, en maintenant la température de l'air au même degré que précédemment, mais les résultats n'ont pas été avantageux. La nature des fontes obtenues était extrêmement variable, et le fer qu'on en retirait était de mauvaise qualité. Pendant les expériences que j'ai faites en 1841, au fourneau d'Audincourt, on portait dans les charges à peu près volumes égaux de charbon et de bois vert. Mais depuis cette époque, on a complétement renoncé à son emploi, bien que l'usine d'Audincourt se trouve dans les conditions les plus favorables, le bois y arrivant par le flottage sur la rivière du Doubs. On a obtenu en supprimant le bois, une plus grande régularité dans la marche du fourneau sans augmentation dans la consommation du combustible. L'emploi, même partiel, du bois vert a été abandonné dans presque toutes les usines de la Franche-Comté. (*Voir* la note page 512.)

Ces résultats s'expliquent d'une manière nette par les faits qui précèdent, et par ceux que j'ai constatés sur la composition des gaz des hauts fourneaux. En effet, la distillation du bois vert opérée dans le haut fourneau ne peut pas produire plus de 17 à 18 pour 100 de charbon, comme on l'a vu plus haut, et cette quantité est inférieure à celle que donnent de bonnes méthodes de carbonisation en meules. D'un autre côté, il est bien constant que les ma-

(1) *Voir* le Mémoire de M. Thirria, *Annales des Mines*, 3e série, t. XVIII, p. 342.

tières volatiles provenant de la distillation du bois, ne peuvent être d'aucune utilité pour la réduction du minerai, puisque celle-ci s'opère à peu près complétement, sans consommation de combustible, par l'oxyde de carbone produit nécessairement dans la partie inférieure du fourneau. Enfin, la distillation rapide du bois a l'inconvénient de donner en général un charbon peu cohérent, qui se brise et produit beaucoup de menu dans le fourneau, d'où résultent une distribution inégale du courant d'air à travers l'appareil et des chutes fréquentes de minerai.

On a reconnu généralement qu'il était indispensable d'employer de l'air fortement échauffé pour alimenter les hauts fourneaux qui consomment une proportion considérable de bois en nature. Dans les essais faits à Audincourt avec du bois vert seul, la température de l'air était de 400 degrés. La quantité de chaleur sensible apportée par l'air peut être considérée comme produisant à elle seule l'échauffement et la fusion des minerais, puisque la distillation du bois devait absorber tout le calorique sensible qui resterait au courant de gaz après la formation de l'oxyde de carbone, si elle avait lieu avec l'air froid. La température devant la tuyère est très-élevée par suite de l'échauffement de l'air, mais elle s'abaisse très-brusquement dans la région où le bois se distille. Si ces deux zones sont voisines, on conçoit que cette distribution de la chaleur dans le fourneau, jointe à la fréquence des chutes de minerais, doive produire des variations continuelles dans l'allure du fourneau et dans la nature des fontes.

L'emploi du bois desséché ou du charbon roux n'est pas sujet aux mêmes inconvénients que celui du bois vert. L'absorption de chaleur latente par le fait de la distillation est d'autant moindre, que la proportion des matières volatiles déjà enlevées est plus grande, tandis que la quantité de charbon laissée par carbonisation rapide est bien plus considérable et peut s'élever aux 0,25 ou 0,26 du poids

du bois vert. On réalise ainsi une économie sur le combustible.

Gaz produits avec la tourbe.

La tourbe employée venait de Saint-Hippolyte (Doubs), où elle est exploitée sur les plateaux élevés du Lomont, le premier chaînon des monts Jura. Elle est brune, et l'on y distingue encore beaucoup de parties herbacées. Depuis longtemps elle était conservée sous des hangars à la forge de Saint-Hippolyte, en sorte qu'elle était très-sèche. Elle est sous forme de briquettes carrées de $0^m,15$ de côté sur $0^m,025$ d'épaisseur. Par une dessiccation prolongée à 100 degrés, elle perd encore 18 pour 100 de son poids.

L'analyse de cette tourbe par calcination a donné :

Charbon	26,2
Cendres	3,4
Matières volatiles	70,4
	100,0

Cette tourbe est une des plus pures que l'on connaisse; les cendres se composent presque entièrement de carbonate de chaux. On y trouve cependant des traces de sulfate de chaux et d'oxyde de fer.

On a chargé cette tourbe dans le même générateur que le bois, et on a conduit la combustion avec la même pression sur le porte-vent : le gaz, qui sort du générateur, brûle à l'air avec une flamme blanche, épaisse et fuligineuse, qui répand une odeur très-désagréable. La température propre des gaz n'est pas suffisante pour produire la fusion du plomb, mais l'étain y fond très-promptement.

Deux expériences ont fourni les données suivantes :

	(13)	(14)
Gaz pour l'analyse	$1^{lit},575$	$1^{lit},525$
Baromètre	$0^m,732$	$0^m,730$
Thermomètre	$15^o,5$	15°
Gaz ramené à 0° et à $0^m,760$	$1^{lit},435$	$1^{lit},390$

		gr	gr
Acide carbonique		0,209	0,297
Produits de la combustion.	Eau	0,068	0,105
	Acide carbonique.	0,643	0,579
	Oxygène absorbé.	0,296	0,306
Dosage direct de l'azote		64,5	59,1

Elles conduisent aux résultats suivants :

	(13)	(14)
Acide carbonique	7,32	10,79
Oxyde de carbone	22,63	21,04
Hydrogène	5,92	9,36
Azote	64,13	58,81
	100,00	100,00

La proportion des produits liquides pour 1 litre de gaz ec, à la température de 0 degré et sous la pression de ^{m},760, a été trouvée de 0^{gr},346, conformément aux donées de l'expérience suivante :

Gaz aspiré	1^{lit},650
Différence de niveau	0^{m},530
Baromètre	0^{m},732
Thermomètre	15°,5
Gaz sec à 0 degré et à 0^{m},760	1^{lit},378
Produits liquides	0^{gr},477

Les résultats des deux analyses qui précèdent diffèrent ès-notablement l'un de l'autre. On peut remarquer ici ue la totalité de l'oxygène de l'air n'est pas transformée a oxyde de carbone, comme cela arrivait quand on emloyait du bois. La quantité d'oxygène contenue dans oxyde de carbone équivaut à peu près aux 0,66 de l'oxyène correspondant à l'azote que renferme le gaz. Ce réultat prouve que le charbon de tourbe n'agit pas sur acide carbonique fortement échauffé, aussi rapidement ue le charbon de bois qui le transformait complétement a oxyde de carbone sur une faible hauteur de combustible. 'est à l'action incomplète du charbon de tourbe sur l'acide

carbonique produit devant la tuyère, qu'il convient d'attribuer les différences observées dans la composition des gaz. Il est probable qu'avec un générateur de gaz d'une plus grande hauteur, ou avec une moindre vitesse de vent, on serait arrivé à séparer les zones de combustion des zones de distillation, et à obtenir des résultats constants dans la nature des gaz produits.

Sous le rapport de la combustibilité, le charbon de tourbe se rapproche du coke. Les analyses des gaz du cubilot de Clerval (p. 388) prouvent que l'air peut traverser une épaisseur de $1^m,30$ de coke sans qu'il y ait plus du tiers de l'oxygène transformé en oxyde de carbone, le surplus restant à l'état d'acide carbonique. Il paraît donc exister, à cet égard, de très-grandes différences entre les diverses espèces de charbons, mais il est assez difficile, dans l'état actuel de nos connaissances, de déterminer avec précision la cause de ces différences (1). Le charbon de bois, une fois allumé, continue à brûler à l'air, sans le secours d'une source de chaleur extérieure. Le coke, dans les mêmes circonstances, s'éteint très-rapidement. La cause la plus vraisemblable de cette diversité d'action sur l'air et sur l'acide carbonique paraît résider dans la porosité du combustible, et se trouve probablement liée aux phénomènes d'absorption des gaz par le charbon.

Ces différences bien constatées dans la combustibilité relative des charbons me paraissent pouvoir expliquer d'une manière satisfaisante celles que l'on observe dans leurs effets calorifiques. Ainsi, l'on sait qu'avec un fourneau à vent ou une forge alimentés par du coke seul, de bonne qualité, on peut obtenir 10 degrés pyrométriques de plus qu'en brûlant du charbon de bois. On a expliqué jus-

(1) Il y a à cet égard des différences très-notables dans l'action des charbons de bois d'essences diverses. Ceux produits par des bois tendres transforment plus rapidement l'acide carbonique en oxyde de carbone que les charbons durs.

qu'ici cette différence, en admettant que la température est proportionnelle jusqu'à un certain point, à la quantité de carbone brûlée dans l'unité d'espace et l'unité de temps, et que cette quantité doit être d'autant plus considérable, que le combustible est plus dense. Or cette conclusion est contraire aux résultats de l'expérience. Il est bien constant que, de tous les combustibles, c'est le charbon de bois qui transforme, dans le moindre espace, et toutes choses égales d'ailleurs, l'oxygène de l'air en oxyde de carbone, et, par conséquent, c'est avec ce combustible que la quantité de carbone brûlée dans l'unité de temps et l'unité d'espace est le plus considérable. Mais nous savons aussi que la température du courant gazeux atteint son maximum après la formation de l'acide carbonique, et diminue rapidement ensuite dans le changement de celui-ci en oxyde de carbone. Plus ce changement s'opérera promptement, plus le lieu du maximum sera restreint. Si donc on a placé dans le foyer la matière à échauffer dans un vase d'une certaine grandeur, dans un creuset par exemple, la température qu'elle prendra ne sera qu'une moyenne des températures que possède le courant de gaz dans chacune des tranches horizontales qui correspondent à la hauteur totale du creuset. On conçoit que si cette hauteur suffit pour transformer une quantité considérable d'acide carbonique en oxyde de carbone, il en résultera nécessairement une différence très-grande de température entre les deux tranches extrêmes, et par suite un abaissement dans la moyenne : telle me paraît être la véritable explication des effets relatifs du coke et du charbon de bois dans les fourneaux à vent et à soufflet qu'on emploie dans les essais par voie sèche. Dans les cubilots, on trouve de même qu'il y a un avantage considérable, sous le rapport du poids du combustible consommé, à employer du coke plutôt que du charbon de bois. Cela tient évidemment à ce que, dans un cubilot alimenté au coke, il n'y a guère que le tiers de

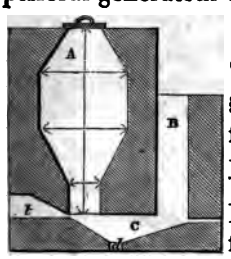
l'acide carbonique formé dans la partie inférieure de l'appareil qui se change en oxyde de carbone. Avec le charbon de bois, la transformation serait certainement complète, autant qu'on peut en juger d'après les expériences rapportées ci-dessus et celles que j'ai faites antérieurement sur les gaz des hauts fourneaux et des feux d'affinerie. Avec le coke, il y a donc une quantité de carbone beaucoup moindre brûlée par le même volume d'air; la température du courant s'abaisse beaucoup moins rapidement à mesure qu'on s'éloigne de la tuyère et se trouve beaucoup plus élevée à sa sortie du fourneau.

Je trouve une nouvelle preuve à l'appui de l'explication que je donne de cette différence d'effets calorifiques produits par le charbon de bois et par le coke, dans les quantités relatives des deux espèces de combustibles brûlées dans les hauts fourneaux pour produire le même résultat. Nous observons ici l'inverse de ce qui a été reconnu pour les cubilots, c'est-à-dire que l'on consomme en coke au moins moitié en sus du charbon de bois pour obtenir la même quantité de fonte. On admet encore généralement que la température des fourneaux au coke est plus élevée que celle des fourneaux au charbon de bois. Dans ceux-ci, cependant, la température produite devant la tuyère est, comme je l'ai démontré précédemment, suffisante pour déterminer presque instantanément la fusion du fer forgé et de la porcelaine, et je ne vois aucune raison pour admettre que, dans les hauts fourneaux au coke, la température puisse s'élever au-dessus de cette limite. Ici la température de la colonne ascendante diminue moins brusquement, à mesure qu'on s'éloigne de la région du maximum, parce que la transformation de l'acide carbonique en oxyde de carbone est plus lente qu'avec le charbon de bois; mais toutes les analogies prouvent qu'elle finira par être complète, en raison de la hauteur de colonne du combustible traversé et de sa haute température. On ne pourra donc pas

réaliser, dans ce cas, l'économie qu'on a trouvée dans l'emploi du coke au cubilot. D'un autre côté, le coke contient toujours plus de cendres que le charbon de bois. A poids égaux, il développera donc une quantité de chaleur absolue moins considérable. Enfin, la plus grande hauteur de la zone oxydante, à partir de la tuyère, dans les fourneaux au coke, oblige de former des laitiers peu fluides, très-basiques, afin qu'ils protégent suffisamment les gouttelettes de fonte dans leur passage devant les tuyères. Ces deux causes expliquent la plus grande consommation de combustible dans les fourneaux au coke que dans ceux alimentés au charbon de bois.

Gaz produits par le bois à combustion renversée.

Dans les expériences ci-dessus, on a vu qu'en lançant de l'air dans un petit fourneau à cuve alimenté exclusivement avec du bois, la distillation de ce combustible s'effectuait au moyen de la chaleur sensible conservée par le mélange d'oxyde de carbone et d'azote provenant de la partie inférieure de l'appareil. Les gaz renferment donc, à leur sortie du générateur, toutes les vapeurs que donne le bois à la distillation, en sorte qu'ils brûlent comme le bois, avec fumée. Dans les expériences qui suivent, je me suis proposé de transformer le bois en gaz combustibles sans mélange de vapeurs condensables ou de fumée, et j'ai employé pour cet objet le petit fourneau représenté ci-dessous, que j'appellerai générateur à combustion renversée.



Dans cet appareil, le combustible est introduit dans la cuve A, dont le gueulard était maintenu exactement fermé dans l'intervalle de deux charges. L'air est lancé, comme à l'ordinaire, par une tuyère *t*, placée à la partie inférieure du fourneau A; mais les pro-

duits de la combustion, au lieu de s'élever verticalement, sont obligés de suivre le conduit C pour sortir à l'air libre, après avoir traversé $0^m,70$ d'épaisseur de charbon qui remplit la capacité B, dont la forme est celle d'un prisme droit à base carrée. Il en résulte que les produits de la distillation du bois qui ne commence à s'opérer dans le fourneau A qu'à une très-petite hauteur au-dessus de la tuyère, sont obligés de passer sous le vent de celle-ci et de traverser le combustible incandescent contenu dans le conduit CB. L'expérience a prouvé que, dans ce cas, les gaz qui se dégagent à l'orifice B ne renferment plus du tout de goudron

Le vent était lancé par une buse de $0^m,005$ de diamètre sous une pression de $0^m,03$ à $0^m,04$ de mercure. On l'arrêtait pour changer le bois dans la capacité A. La combustion devant la tuyère se faisait toujours avec une flamme rouge, par l'action directe de l'air sur des morceaux de bois à peine charbonnés à la surface. Les cendres du bois ne fondaient pas, et on les retirait de six en six heures par les ouvertures *d*. Quant au charbon contenu en B, on le chargeait, au fur et à mesure de son abaissement, de façon à ce que son niveau ne descendît pas à plus de $0^m,10$ de l'orifice de sortie.

En n'employant que du bois cru dans le foyer A, on a obtenu des gaz dont la composition a été déduite des expériences suivantes :

		(15)	(16)	(17)
Gaz pour l'analyse		$1^{lit},565$	$1^{lit},585$	$1^{lit},530$
Baromètre		$0^m,722$	$0^m,720$	$0^m,720$
Thermomètre		13°	14°	$9^o,5$
Gaz ramené à 0° et à $0^m,760$		$1^{lit},419$	$1^{lit},428$	$1^{lit},400$
Acide carbonique		$0^{gr},357$	$0^{gr},380$	$0^{gr},368$
Produits de la combustion.	Eau	0,196	0,217	0,199
	Acide carbonique	0,530	0,526	0,540
	Oxygène absorbé	0,368	0,375	0,364
Dosage direct de l'azote		50,8	49,2	50,1

Détermination des vapeurs d'eau :

Gaz aspiré.....	$1^{lit},400$
Différence de niveau.....	$0^{m},500$
Gaz sec à 0° et à $0^{m},760$.....	$1^{lit},182$
Eau condensée.....	$0^{gr},085$

Ces données conduisent aux compositions suivantes :

	(15)	(16)	(17)	Moyenne.
Acide carbonique.....	12,70	13,43	13,27	13,20
Oxyde de carbone.....	18,86	18,60	19,48	18,98
Hydrogène.....	17,10	18,83	17,61	17,85
Azote.....	51,34	49,14	49,64	49,97
	100,00	100,00	100,00	100,00
Vapeur d'eau p. 100 vol. gaz sec, à 0° et à $0^{m},760$.	8,8			

La flamme qui se dégage à l'ouverture B est jaunâtre, mais sans aucune fumée. Il se condense un peu d'eau dans les tubes d'aspiration des gaz, mais cette eau n'est pas acide et ne contient pas une trace de goudron. Le charbon dans le fourneau carré paraît chauffé au rouge sombre et l'antimoine fond facilement dans le courant de gaz qui s'en dégage. En 10^{h}, on a brûlé dans le générateur à combustion renversée $0^{m.c},44$ de bois pesant 176 kilogrammes et dans le fourneau carré $0^{m.c},06$ de charbon pesant 15 kilogrammes.

Les analyses suivantes se rapportent à des gaz obtenus lorsqu'on chargeait dans le générateur A des poids égaux de bois et de charbon. Les expériences avaient pour bases les données suivantes :

	(18)	(19)
Gaz pour l'analyse.....	$1^{lit},555$	$1^{lit},565$
Baromètre.....	$0^{m},726$	$0^{m},731$
Thermomètre.....	15°	10°,5
Gaz ramené à 0 degré et à $0^{m},760$..	$1^{lit},408$	$1^{lit},449$

		gr	gr	
Acide carbonique		0,218	0,178	
Produits de la combustion.	Eau	0,113	0,131	
	Acide carbonique	0,649	0,754	
	Oxygène absorbé	0,335	0,366	
Détermination de la vapeur d'eau.	Gaz aspiré	0^{lit},350	1^{lit},600	1^{lit},370
	Différence de niveau	0^{m},200	0^{m},500	0^{m},300
	Gaz sec à 0° et à 0^{m},760	1^{lit},166	1^{lit},385	1^{lit},185
	Eau condensée	0^{gr},065	0^{gr},026	0^{gr},016

Elles conduisent aux résultats suivants :

	(18)	(19)
Acide carbonique	7,82	6,21
Oxyde de carbone	23,28	26,30
Hydrogène	10,00	11,20
Azote	58,90	56,29
	100,00	100,00
Vapeur d'eau p. 100 vol. de gaz sec.	6,8	2,4 : 1,7

Dans ces expériences, la couleur de la flamme du petit fourneau est un peu variable, tantôt bleuâtre à bords rouges, tantôt claire et jaunâtre. La quantité de combustible consommée en A a été par heure de 7 kilogrammes de bois et de 7 kilogrammes de charbon. La quantité de charbon brûlée dans la capacité B n'a été que de 2 kilogrammes par 5 heures de roulement.

Enfin, en brûlant dans le générateur A, 2 parties de charbon et 1 de bois en poids, on a obtenu dans trois expériences :

		(20)	(21)	(22)
Gaz pour l'analyse		1^{lit},565	1^{lit},530	1^{lit},580
Baromètre		0^{m},732	0^{m},720	0^{m},720
Thermomètre		14°	9°,5	13°,5
Gaz ramené à 0° et à 0^{m},760		1^{lit},432	1^{lit},400	1^{lit},42
		gr	gr	gr
Acide carbonique		0,179	0,123	0,15
Produits de la combustion.	Eau	0,107	0,117	0,13
	Acide carbonique	0,704	0,755	0,7[illegible]
	Oxygène absorbé	»	0,374	»

Détermination de la vapeur d'eau.	Gaz aspiré.....	$1^{lit},480$	Vapeur d'eau p. 100 vol. gaz sec à 0° et $0^{m},760$ 2,30
	Différence de niveau...	$0^{m},550$	
	Gaz sec à 0° et à $0^{m},760$.	$1^{lit},280$	
	Eau condensée.....	$0^{gr},025$	

Ces données fournissent les compositions suivantes.

	(20)	(21)	(22)
Acide carbonique.....	6,31	4,43	5,35
Oxyde de carbone.....	24,82	27,24	26,54
Hydrogène.....	9,27	10,35	11,47
Azote.....	59,60	57,98	56,64
	100,00	100,00	100,00

Pendant la durée du roulement correspondant aux trois dernières analyses, il ne se brûle qu'une quantité de charbon très-faible dans le fourneau B. L'aspect de la flamme est variable. Ces variations dans l'aspect du gaz, dans les expériences (18) à (22), tiennent au mélange de bois et de charbon qui ne peut s'opérer d'une manière assez intime pour que ces deux combustibles se brûlent toujours devant la tuyère dans les mêmes proportions relatives.

Les expériences (15), (16), (17) prouvent qu'on peut facilement transformer le bois cru en un mélange gazeux renfermant 0,36 d'un gaz combustible formé de volumes à peu près égaux d'hydrogène et d'oxyde de carbone, et dans lequel les produits qui constituent la fumée ont complétement disparu. La quantité de charbon consommée est les 0,08 environ du poids du bois. Quant au service de l'appareil A et à la nécessité de maintenir l'ouverture de chargement fermée, cela ne présente aucune difficulté. On peut faire varier les formes et les dimensions intérieures de ce fourneau; mais il devra toujours satisfaire à la condition que la distance de la tuyère au contrevent soit peu considérable, afin que les produits de la distillation du bois soient toujours forcés de passer sous le vent de la tuyère. Enfin on pourrait lui donner des dimensions assez considé-

rables pour qu'il ne fût pas nécessaire d'ouvrir le gueulard à des intervalles rapprochés. La carbonisation ne commençant à s'opérer que dans le voisinage de la tuyère, il n'y a aucun inconvénient à ce qu'il reste un vide assez grand dans la partie supérieure de l'appareil, et on pourrait le disposer de façon à n'avoir besoin d'ouvrir le gueulard que toutes les 12 ou 24 heures seulement.

L'appareil que je viens de décrire peut être employé, non-seulement pour brûler le bois et d'autres combustibles analogues en lançant de l'air sur le gaz produit, mais encore pour certains usages métallurgiques. Ainsi, il y a certains métaux qu'on ne cherche pas à obtenir par la fusion des minerais grillés dans un fourneau à manche, parce que la haute température produite nécessairement devant la tuyère détermine la volatilisation d'une quantité considérable de métal. Je citerai, par exemple, l'antimoine qu'on est obligé de préparer dans des creusets. En chargeant au contraire le charbon en A et le minerai grillé en B, il est évident que la colonne de minerai serait traversée par un courant de gaz réducteurs et possédant une température qui n'atteindrait pas la chaleur blanche dans tous les points où elle se trouve en contact avec le minerai. Le métal pourrait se séparer ici, par une espèce de liquation, des gangues ou matières moins fusibles. Je ne fais qu'indiquer ici ce point de vue qui peut être susceptible d'application dans le traitement de quelques métaux.

La composition des gaz produits dans les expériences précédentes à combustion renversée prouve que les proportions d'acide carbonique et de vapeur d'eau contenues dans les gaz augmentent à mesure que la valeur calorifique du combustible brûlé diminue, et le résultat est la conséquence de l'absorption de chaleur latente produite par la conversion de l'acide carbonique et de la vapeur d'eau en oxyde de carbone et hydrogène.

Dans les expériences (15), (16), (17), une partie seule-

nent de l'oxygène de l'air projeté se change en oxyde de arbone, et ce fait est facile à concevoir d'après ce qui précède. Ici nous trouvons une vérification pour les résultats les analyses. En effet, le bois employé pouvant se représenter à très-peu près par du charbon et de l'eau, il faut qu'en retranchant de la totalité de l'oxygène combiné dans 100 volumes de gaz, celui qui correspond à 49,97 d'azote, on ait pour reste un volume moitié de celui de l'hydrogène. En faisant ce calcul sur la moyenne des 3 expériences indiquées, on trouve 9,56 d'oxygène pour 17,85 d'hydrogène, et 26,65 de vapeur d'eau pour 16,09 de vapeur de carbone, ou, en poids, 21,5 d'eau pour 17,2 de carbone. Or la quantité de carbone comprend celle qui est brûlée dans le four arré B, et qui peut être évaluée très-approximativement à $\frac{1}{3}$ du carbone contenu dans le bois. En faisant cette correction, il reste pour les proportions respectives d'eau et le carbone contenu dans le bois, 21,5 et 13,8, ou 39 de arbone pour 61 d'eau, nombres qui diffèrent peu de ceux qu'on admet généralement pour représenter la composition du bois desséché à l'air à la température ordinaire.

La quantité de chaleur rendue disponible par la combustion du bois, au moyen de l'oxygène de l'air, a permis la décomposition d'une certaine quantité de vapeur d'eau et d'acide carbonique par le charbon. La composition des gaz produits montre que cette réaction n'a pas eu lieu d'une manière exclusive sur l'un de ces corps, puisque le gaz contient des volumes à peu près égaux d'oxyde de carbone et d'hydrogène, et de l'acide carbonique et de la vapeur d'eau dans les rapports de 3 à 2. Si l'on compare ce résultat avec celui obtenu plus haut (7), (8), (p. 479), par l'action de la vapeur d'eau sur le charbon, et avec ceux que présente dans les hauts fourneaux l'action d'un mélange d'oxyde de carbone en grand excès et d'hydrogène sur l'oxyde de fer, on en déduit d'après quelles règles s'opère le partage de l'oxygène entre l'hydrogène et l'oxyde de car-

bone. Les résultats sont tout différents lorsqu'on fait varier les proportions respectives des deux gaz.

En effet, dans le haut fourneau où l'oxyde de carbone est en grand excès par rapport à l'hydrogène, tout l'oxygène du minerai se porte sur le premier des gaz.

En faisant réagir à la fois de l'air et de la vapeur d'eau sur du charbon, nous avons vu que l'oxygène de l'eau formait de l'acide carbonique, sans doute parce qu'il y avait déjà une grande quantité d'oxyde de carbone dans le gaz formé par la réaction de l'air sur le charbon.

Enfin, dans les expériences qui précèdent (15), (16), (17), l'acide carbonique et la vapeur d'eau se sont décomposés simultanément par le charbon, de façon à produire des volumes égaux d'oxyde de carbone et d'hydrogène.

Si l'on ajoute à ces résultats que l'acide carbonique est décomposé par l'hydrogène à une haute température, fait qui se trouve énoncé dans tous les Traités de Chimie, et que très-probablement l'oxyde de carbone en excès décomposerait la vapeur d'eau, en produisant de l'acide carbonique et de l'hydrogène, on en conclura que l'affinité *absolue* des deux gaz pour l'oxygène est à peu près la même et qu'il faut rapporter à des actions de masse la différence des résultats obtenus. Ces faits sont de même ordre et s'expliquent de la même manière que l'action de la vapeur d'eau ou de l'acide carbonique sur le fer incandescent, et l'action inverse de l'hydrogène ou de l'oxyde de carbone sur l'oxyde de fer formé.

Résumé et conclusions.

Avant de récapituler les résultats de toutes les expériences rapportées dans ce Mémoire et d'en déduire quelques conclusions générales sur la production et l'emploi des gaz, je dois examiner de quelle manière la combustion s'opère dans le procédé actuel des fours à réverbère et à grille.

L'air qui produit la combustion est aspiré par une cheminée placée à l'arrière du four et traverse une grille sur laquelle se trouve une certaine épaisseur de combustible. Dans cet appareil, la quantité de chaleur utilisée est d'autant moindre que la température à laquelle doivent être soumis les corps à échauffer est plus élevée, par cette raison que les produits de la combustion, après avoir traversé la sole du four, doivent avoir encore une température supérieure à cette température limite.

Dans les opérations de la métallurgie du fer qui s'exécutent dans des fours à réverbère, la quantité de chaleur utilisée n'est qu'une faible fraction de celle développée par la combustion. Clément Desormes a constaté par expérience que dans les fours à réverbère employés à refondre la fonte, la quantité de chaleur utilisée n'était que les 0,09 de celle produite. En calculant le même coefficient pour les fours à réchauffer le fer, on trouve que l'effet utile n'atteint pas les 0,05 de la chaleur développée (1).

Il y a une autre portion de chaleur qui est nécessairement perdue par le rayonnement des parois du four; mais il est à peu près certain que les 0,90 au moins sont entraînés dans la cheminée.

On est parvenu récemment à utiliser les flammes perdues des fours à puddler et à réchauffer pour produire de la vapeur sans augmenter la consommation des fours. La quantité de vapeur produite représente moyennement les 0,40 de l'effet utile du combustible consommé sur la grille du four (2). Ces résultats sont fort importants; mais il est un grand nombre d'usines où l'on n'a pas besoin de force

---

(1) J'admets que l'on brûle $0^k,6$ de houille par kilogramme de fer à réchauffer, que la houille donne par kilogramme 6,000 unités de chaleur, que la chaleur spécifique du fer est de 0,114, et que la température à laquelle il doit être porté est de 1,500 degrés, d'après M. Pouillet.

(2) *Voir* les Mémoires de MM. Flachat et Vuillemin, *Annales des Mines*, 3e série, t. XVII, p. 113, et 4e série, t. II, p. 688.

motrice produite par un combustible, et où l'on cherche seulement à consommer le moins possible de houille pour obtenir un effet déterminé.

Dans les fours à grille, le coefficient d'utilisation ne peut varier que dans des limites restreintes. Pour une houille donnée, la température de combustion ne peut guère varier, puisqu'on ne peut changer ni la température du combustible, ni celle de l'air comburant. Il est évident que le *maximum* correspond à la transformation réciproque et complète de l'oxygène de l'air et du combustible solide en eau et acide carbonique, et que l'excès d'air ou de gaz non brûlés tend également à abaisser la température du courant. Cette condition est fort difficile à réaliser dans la pratique, parce qu'elle dépend de l'épaisseur du combustible sur la grille et de la vitesse de l'air qui la traverse. M. Péclet a conclu de ses expériences (1) que la quantité d'air qui échappait à la combustion était ordinairement égale à la moitié de la quantité totale et à $\frac{1}{3}$ ou $\frac{1}{4}$ quand le tirage était très-fort. Cette circonstance seule tend à abaisser considérablement la température de combustion, et par conséquent à diminuer le coefficient qui représente la portion de chaleur utilisée sur la sole du four.

Les circonstances de la combustion dans un four à gaz sont bien différentes des précédentes. Cette combustion s'opère, comme on l'a vu, au moyen d'un courant d'air forcé, projeté par un grand nombre d'ouvertures sur le gaz combustible, et dans un espace très-restreint. Le mélange de l'air avec les gaz a lieu complétement à une petite distance de leur entrée dans le four. Les analyses (4), (5) des gaz brûlés pris dans l'intérieur du four ont établi, contrairement à ce qui arrive dans les fours à grille, qu'il était facile d'introduire exactement la quantité d'air nécessaire pour brûler le gaz. La combustion s'opérant ici sous pression,

(1) *Traité de la Chaleur*, t. I, p. 299, 1re édition.

alité de la chaleur que conserve le gaz après son pas-
sur la sole du four peut être utilisée sans nuire à la
ne de l'appareil. On peut l'employer notamment pour
· la température de l'air comburant et celle du gaz
ustible.

tableau suivant, qui résume la composition des gaz
uits dans les diverses séries d'expériences (à l'exception
lles à combustion renversée), permettra d'apprécier
ence du réchauffage de l'air et des gaz sur les tempé-
es de combustion et sur la quantité de chaleur utili-
Les gaz sont supposés dépouillés de vapeur d'eau (1).]

---

our calculer les nombres contenus dans le tableau, j'ai employé le
s suivant :
produits du poids d'un litre de gaz par la chaleur spécifique de ce
la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 degré la tempéra-
n litre, sont respectivement :

Air	0,346
Azote	0,348
Acide carbonique	0,437
Oxyde de carbone	0,358
Hydrogène	0,293
Vapeur d'eau	0,686

représenté par a, b, c, d, les volumes d'azote, d'oxyde de carbone,
carbonique et d'hydrogène contenus dans un litre de gaz.
lume d'oxygène nécessaire pour la combustion d'un litre de gaz sera
, et celui de l'air correspondant $\frac{(b+d)}{2} \times \frac{100}{20,8} = 2,40\,(b+d)$.
t t, t' les températures du gaz et de l'air comburant (dans les calculs
s, on a supposé $t = t' = 300°$). Les quantités de chaleur sensible
ossèdent seront respectivement :
le gaz, $t\,(0,348\,a + 0,358\,b + 0,437\,c + 0,293\,d)$.
l'air, $2,40\,t'\,(b+d) \times 0,346 = 0,830\,t'\,(b+d)$.
ait que l'hydrogène et l'oxyde de carbone dégagent sensiblement la
uantité de chaleur sous le même volume, soit 3,130 unités par litre
La quantité de chaleur produite par un litre de mélange sera
$b+d)$.
oduits de la combustion d'un litre de gaz par l'air seront :
ne de la vapeur d.
ne de l'acide carbonique $b+c$.
ne de l'azote, $a + 2,40\,(b+d) - \frac{1}{2}(b+d) = a + 1,90\,(b+d)$.
empérature de combustion sera donnée par la formule

$$\frac{(b+d) + t\,(0,348\,a + 0,358\,b + 0,437\,c + 0,293\,d) + 0,830\,t'(b+d)}{0,686\,d + 0,437\,(b+d) + 0,348\,[a + 1,90\,(b+d)]}$$

NUMÉROS d'ordre.		A. Roulement au menu charbon, air froid. (1), (2), (3).	B. Charbon, air froid, vapeur à 250°. (7), (8).	C. Bois vert, air froid. (10), (11)	D. Tourbe, air froid. (13), (14).
1.	Composition des gaz sur 1 litre..... *a.* Az.....	0,634	0,532	0,501	0,615
	b. CO....	0,333	0,272	0,324	0,219
	c. CO^2...	0,005	0,056	0,072	0,090
	d. H.....	0,028	0,140	0,103	0,076
	Total.....	1,000	1,000	1,000	1,000
2.	Température des gaz à leur sortie du générateur.	500° ?	240°	125°	300°
3.	Vapeur de carbone sur 1 litre de gaz	lit 0,169	lit 0,164	lit 0,198	lit 0,154
4.	Air nécessaire à la combustion sur 1 litre de gaz.	lit 0,87	lit 0,99	lit 1,02	lit 0,71
5.	Quantité de chaleur que prend 1 litre de gaz pour passer de 0° à 300°.....	105,0	104,4	105,6	105,9
6.	Quantité de chaleur prise par l'air comburant pour passer de 0° à 300°..	90,3	102,9	105,3	73,7
7.	Total des colonnes (5)(6).	195,3	207,3	210,9	179,6
8.	Chaleur de combustion sur 1 litre de gaz.....	1.129,9	1.289,6	1.336,5	923,3
9.	Total des colonnes (7)(8).	1.325,2	1.496,9	1.547,4	1.102,9
10.	Température de combustion, l'air et les gaz étant à 0°.	1.815°	1.852°	1.910°	1.551°
11.	Température de combustion, l'air et les gaz étant chauffés à 300°.....	2.117°	2.150°	2.210°	1.853°
12.	Quantité de chaleur utilisée dans les fours, en admettant que la température du courant s'abaisse à 1,500°. ..... Air et gaz à 0°. ..	198,9	243,6	287,5	30,3
	Air et gaz à 300°.	386,0	452,0	497,0	210,0

J'ai supposé, pour calculer les nombres contenus dans la dernière colonne du tableau, que la température des gaz, après leur combustion, pouvait s'abaisser à 1,500 degrés par le contact des matières placées sur la sole du four.

Je ferai remarquer de plus que les nombres qui représentent les températures de combustion ne sont qu'approximatifs, puisqu'ils ont été calculés en supposant les chaleurs spécifiques des gaz constantes aux différentes températures, ce qui n'est probablement pas exact.

L'examen du tableau qui précède nous permet d'énoncer les conclusions suivantes :

1°. En produisant des gaz au moyen du charbon et de l'air froid, l'oxygène de l'air se change complétement, dans les circonstances de nos expériences, en oxyde de carbone. La température propre des gaz qui s'échappent du générateur est supérieure à celle de la fusion de l'antimoine.

Aussitôt qu'on introduit de la vapeur d'eau avec l'air, la proportion des gaz combustibles augmente dans le mélange gazeux, mais sa température à la sortie du générateur s'abaisse. Ce résultat est une conséquence nécessaire de l'absorption de chaleur latente produite par la décomposition de la vapeur d'eau au contact du charbon (1). La quantité de vapeur qu'on peut introduire dans le générateur est nécessairement limitée et dépend de la quantité de chaleur disponible dans l'appareil. Elle sera d'autant plus grande que la quantité de chaleur sensible apportée par

(1) En admettant, comme cela résulte des expériences (7) et (8), que la vapeur d'eau produise de l'acide carbonique et de l'hydrogène, on en déduit que, pour 1 litre de vapeur de carbone ($1^{gr},077$), il y a 4 litres de vapeur d'eau décomposée, production de 2 litres d'acide carbonique et de 4 litres d'hydrogène. Or, la combustion du carbone a dû produire 7,858 unités de chaleur. Mais comme les 4 litres d'hydrogène formés dégageraient 12,520 unités par leur combustion, on en déduit que l'absorption de chaleur latente correspondante à 1 litre vapeur carbone, serait 4,662 unités. On peut, d'après cela, calculer quel doit être l'abaissement produit, dans la température du gaz sortant du générateur, par la quantité de vapeur d'eau décom-

l'air et la vapeur sera plus considérable. Avec de l'air et de la vapeur fortement échauffés, on peut évidemment parvenir à charger le gaz d'une proportion considérable de gaz combustibles, tout en conservant au gaz sortant une même température (240 degrés).

On trouve, en consultant le tableau, que la quantité de carbone brûlée en employant de la vapeur, est un peu moindre pour 1 litre de gaz produit, que si l'on n'emploie que de l'air (16,4 au lieu de 16,9), et en même temps que la quantité de chaleur produite par la combustion de 1 litre de gaz s'élève de 1,130 à 1,290, c'est-à-dire de 0,12. Ce résultat tient, comme je l'ai déjà fait remarquer, à ce que la chaleur propre que conserve le gaz à la sortie du générateur, dans le roulement à l'air seul, est absorbée en partie et transformée en chaleur de combustion. La température de combustion reste à peu près stationnaire, ce que l'on doit attribuer à l'élévation du chiffre qui représente le calorique spécifique de la vapeur d'eau; mais pour arriver à la température de 1,500 degrés, les produits de la combustion cèdent une quantité de chaleur qui varie de 386 à 452 par litre de gaz, et l'on voit que l'avantage est encore ici du côté du gaz produit avec la vapeur d'eau.

Le seul inconvénient que présente la vapeur d'eau consiste, comme nous l'avons vu, dans le refroidissement qu'elle occasionne devant la tuyère et qui peut être tel, que

---

posée dans les expériences B (p. 506). En effet, la quantité de carbone, brûlée par la vapeur d'eau, a été de $0^{lit},028$, puisqu'il y a eu $0^{lit},056$ d'acide carbonique produit. La quantité de vapeur d'eau décomposée a été $4 \times 0,028 = 0^{lit},112$, et l'absorption de chaleur correspondante

$$0,028 \times 4,662 = 130,5.$$

La quantité de chaleur sensible apportée par la vapeur, qui était chauffée à 250°, sera $0,112 \times 0,686 \times 250 = 19,2$. En admettant 0,350 pour la quantité de chaleur prise par un litre de gaz pour s'échauffer de 1 degré, on trouve que l'abaissement de température sera : $\frac{130,5 - 19,2}{0,350} = 318°$, nombre qui ne diffère pas beaucoup de celui que donne l'expérience et qui serait la différence entre 500° et 240°.

des matières fusibles à une température basse, comme les scories de forges, ne s'y fondent plus. Si l'on n'employait que des charbons très-purs, comme le charbon de bois, cette circonstance serait peu importante, parce qu'il n'en résulterait pas d'engorgement dans le générateur de gaz, mais il n'en serait pas de même pour des menus charbons ou pour des combustibles minéraux. Au reste, il me paraît facile de maintenir devant la tuyère une température très-élevée, tout en conservant au produit gazeux sa richesse en principes combustibles. Il suffirait, pour cela, d'introduire la vapeur par un orifice particulier situé à $0^m,40$ ou $0^m,50$ au-dessus de la tuyère à air; son effet chimique serait le même. Seulement il y aurait un abaissement brusque de température dans la région du fourneau où la vapeur serait introduite et qui devrait être d'autant plus éloignée de la tuyère à air, que la transformation de l'oxygène de l'air en oxyde de carbone, au moyen du combustible employé, serait moins rapide. L'action de la vapeur d'eau sur la température de la colonne ascendante serait tout à fait comparable à celle que produit la distillation du bois et qui détermine aussi un abaissement brusque dans la chaleur propre du courant.

Il y a nécessairement avantage à ce que la chaleur sensible du courant de gaz combustible, à sa sortie du générateur, soit aussi faible que possible. On évitera ainsi la perte de chaleur qu'éprouverait le courant avant d'arriver au four, et la quantité de chaleur qu'il pourra prendre à la flamme perdue du four sera d'autant plus grande que sa température initiale aura été moins élevée. Cette quantité de chaleur, ainsi que celle prise par l'air comburant, forment une fraction assez considérable de la chaleur de combustion totale. La température de combustion croît rapidement à mesure qu'on augmente la quantité de chaleur sensible apportée par l'air et les gaz. Il en est de même de la quantité de chaleur utilisée sur la sole.

La vitesse d'échauffement des corps solides qui s'y trouvent placés, croît aussi avec une très-grande rapidité, à mesure que la différence entre les températures de combustion et la température limite qu'il s'agit de produire augmente.

J'ai indiqué 300 degrés pour la température de l'air. Il est facile d'arriver à ce degré de chaleur dans l'appareil placé à la suite du four, mais il ne serait pas convenable de le dépasser. En élevant davantage la température, les tuyaux de fonte rougissent et le métal se détache par écailles; il y a de même une oxydation assez considérable à l'intérieur des tuyaux. La température des gaz peut être facilement portée à 300 degrés, et on pourrait peut-être dépasser cette limite, parce qu'il n'y a pas à craindre d'oxydation à l'intérieur des tuyaux.

La quantité de chaleur non utilisée pourra encore être employée : 1° à produire de la vapeur pour le générateur; 2° à chauffer cette vapeur, ainsi que l'air employé à la production du gaz, afin de pouvoir augmenter la proportion de vapeur injectée.

2°. Les gaz produits avec le bois cru ne possèdent à leur sortie du générateur qu'une température très-peu élevée : il ne serait donc pas convenable d'employer ici de la vapeur d'eau. Leur composition nous apprend que si l'on parvenait à les débarrasser des produits liquides de la distillation du bois, ils développeraient par leur combustion une température supérieure à celle des gaz du charbon. C'est la présence de ces matières qui s'oppose à ce qu'on puisse obtenir de l'emploi du bois, dans les fours à réverbère, une température très-élevée, parce que l'eau y domine et que sa chaleur spécifique est très-considérable. Je crois qu'on pourrait arriver sans difficulté à dépouiller le gaz du bois de la presque totalité de ces produits, en les faisant circuler, avant de les employer, dans des chambres et des conduits d'un volume suffisant pour déterminer la condensation des vapeurs. Ce serait en même temps un moyen fort

économique et fort simple de préparer l'acide acétique du bois et le goudron qui pourraient alors devenir des produits accessoires importants. Il ne me paraît pas douteux, d'après les résultats qui précèdent, que la transformation du bois en gaz ne puisse être substituée avec une grande économie à l'emploi direct de ce combustible, dans toutes les circonstances où l'on a pour but de produire une température très-élevée.

3°. La composition des gaz produits avec la tourbe est bien différente de celle des gaz de la distillation du bois, et j'ai attribué ce résultat inattendu à ce que la transformation de l'acide carbonique en oxyde de carbone n'était pas encore complète, lorsque la colonne ascendante arrive dans la région de la distillation. En augmentant la hauteur du générateur ou en diminuant la vitesse de la colonne ascendante, il est bien probable qu'on arriverait à séparer nettement les deux zones et à obtenir des résultats semblables à ceux fournis par le bois. On serait donc conduit à substituer la combustion des gaz produits par la tourbe, après condensation des vapeurs, à sa combustion directe sur la grille du four à réverbère.

J'ai constamment cherché, dans toutes les expériences qui précèdent, à produire des gaz par l'action directe de l'air seul ou mêlé de vapeur d'eau sur le combustible en excès. La distillation des combustibles en vase clos produit aussi des gaz, mais elle laisse un résidu qui renferme ordinairement la plus grande partie du carbone qu'ils contiennent. Ce moyen ne permettrait donc pas de transformer complétement le combustible en gaz. En outre, le service des appareils serait fort incommode, et il serait très-difficile de faire pénétrer jusqu'à leur centre la quantité de chaleur nécessaire pour effectuer la distillation.

Note citée page 488.

Roulement du fourneau d'Audincourt marchant au bois et au charbon ou au charbon seul.

Le tableau suivant indique les résultats du roulement du haut fourneau d'Audincourt quand il consommait du bois et du charbon ou du charbon seul. Le haut fourneau avait été remis en feu en février 1841, et son roulement a été arrêté le 1er octobre 1842.

A cette époque le haut fourneau d'Audincourt avait comme dimensions principales les dimensions suivantes :

	m
Hauteur totale du fourneau.....	11,00
Hauteur de la cuve.....	8,67
Diamètre au gueulard.....	0,66
Diamètre au ventre.....	2,33
Largeur de l'ouvrage..... (De la tuyère au contrevent.)	0,45

Les *fig.* 1, 2, 3, (p. 292), représentent une coupe de l'appareil prise à la hauteur de la tuyère et deux coupes verticales, l'une par un plan passant par la tuyère et l'axe, l'autre par un plan perpendiculaire à ce dernier.

On voit par ce tableau que 2st,34 de bois n'équivalaient qu'à 6 hectolitres de charbon ou environ 0,25 de leur volume, en comparant les résultats du mois de janvier à ceux du mois d'août. La comparaison du mois de février avec le mois de septembre donne encore des résultats moins favorables à l'emploi du bois.

L'hectolitre de charbon pesant 230 kilogrammes et celui de la braise 180 kilogrammes, on voit que la consommation en charbon, pour le mois d'août, n'a été que de 98 pour 100 de fonte.

CONSOMMATIONS PENDANT LES MOIS DE JANVIER, FÉVRIER, AOUT ET SEPTEMBRE 1842.									TOTAL DU PRODUIT.	MIS AU MILLIER.								
Bois.	Charbon.	Braise.	Laitier de feu de forges.	Castine.	Scories.	Minerais en grains.	Minerais en roche.	Total général des mines.	fonte.	Charbon.	Bois.	Braise.	Laitier.	Scories.	Castine.	Mine en grains.	Mine en roche.	Total des mines.
st.	hect.	hect.	hect.	hect.	hect.	hect.	hect.	hect.	kil.	hect.	st.	hect.	hect.	hect.	hect.	hect.	hect.	hect
302	4.348	543,5	14,15	95,03	40,20	1.340,23	434,80	1.775,03	128.845	33,76	2,34	4,21	0,10	0,31	0,73	10,40	3,37	13,77
299	4.280	361,0	53,50	85,60	»	1.356,55	428,00	1.784,55	120.142	35,53	2,23	4,44	0,44	»	0,71	11,26	3,55	14,81
»	5.255	535,5	210,20	136,63	»	1.209,35	472,95	1.682,30	132.335	39,70	»	4,04	1,59	»	1,40	9,13	3,58	12,71
»	4.995	119,0	199,80	131,81	»	1.171,50	483,05	1.654,55	127.683	39,12	»	0,93	1,56	»	1,03	9,17	3,78	12,95

X.

Recherches sur la production et l'emploi des gaz combustibles dans les arts métallurgiques. (Deuxième Mémoire.)

J'ai examiné, dans le travail précédent (page 463), la composition des gaz produits avec des combustibles d'origine végétale, le charbon de bois, le bois et la tourbe, en employant dans le générateur de l'air seul ou mélangé de vapeur d'eau. Je rapporte ici les résultats que j'ai pu joindre aux précédents, dans le courant de cette campagne, et qui concernent seulement l'emploi et la composition des gaz produits avec le coke.

Le générateur de gaz que j'ai fait établir à Pont-l'Évêque avec le concours de M. Roche, ancien élève de l'école des Mines de Saint-Étienne, diffère peu, par ses dimensions et sa forme, de celui qui m'avait servi l'année précédente, à Audincourt, pour brûler des menus charbons. Sa coupe horizontale est un carré à toutes les hauteurs. Voici les principales dimensions de ce générateur :

	m
Largeur au gueulard	0,40
Hauteur de la cuve	1,90
Largeur au ventre	1,30
Hauteur de la partie prismatique	0,40
Hauteur des étalages	0,60
Hauteur de l'ouvrage	0,30
Largeur devant les tuyères	0,35
Hauteur du creuset	0,30
Hauteur totale du générateur	3,50

Cet appareil a servi à chauffer le four à réverbère de mazerie, représenté plus haut, page 459, en élévation *fig.* 1, et en plan *fig.* 2, à l'échelle de $0^m,015$ pour mètre; il fut

employé dans l'intervalle compris entre la fin du roulement du haut fourneau et sa mise en feu qui a eu lieu dans les premiers jours d'octobre 1843. Un tuyau de fonte de $0^m,21$ de diamètre intérieur prenait les gaz à $1^m,40$ au-dessous du gueulard et les amenait dans le four à réverbère par une conduite en fonte de 5 mètres de longueur. Des ouvertures étaient ménagées dans les coudes des tuyaux pour pouvoir les nettoyer commodément.

Le vent était projeté dans le générateur par une tuyère de $0^m,040$ de diamètre, sous une pression de $0^m,025$ à $0^m,030$ de mercure.

On a mis en feu le générateur avec du coke. Après quelques jours de tâtonnements pour arriver à fondre facilement les cendres du combustible qui engorgeaient le générateur, on est arrivé à produire un laitier suffisamment fluide, en chargeant par chaque rasse de 22 kilogrammes de coke, 4 kilogrammes de laitier de haut fourneau et 8 kilogrammes de castine. A partir du moment où le laitier est arrivé bien liquide, la marche du générateur a été tout à fait régulière, et l'on a pu facilement appliquer les gaz du générateur au mazéage de la fonte.

Chaque opération s'exécutait à la fois sur 300 kilogrammes de fonte et durait environ 2 heures.

On consommait en moyenne par heure de roulement du générateur 77 kilogrammes de coke. On chargeait le coke en même temps que la fonte, en sorte que le gueulard du générateur restait complétement fermé pendant toute l'opération du mazéage.

La température de l'air qui servait à la combustion des gaz a varié dans mes expériences entre 160 et 180 degrés.

La température des gaz près du four était suffisante pour produire la fusion du zinc, mais non celle de l'antimoine. Elle était comprise entre 360 et 432 degrés.

Les gaz, après leur combustion dans le four, produisaient une odeur sensible d'acide sulfureux.

Les gaz pris dans la conduite du générateur au four ont fourni, dans deux expériences, les données suivantes :

		(1)	(2)
Gaz pour l'analyse		$1^{lit},495$	$1^{lit},495$
Baromètre		$0^{m},760$	$0^{m},745$
Thermomètre		20°	16°,5
Gaz ramené à 0° et à $0^{m},760$		$1^{lit},392$	$1^{lit},382$
Acide carbonique		gr 0,022	gr 0,025
Produits de la combustion.	Eau	0,014	0,019
	Acide carbonique	0,918	0,924
	Oxygène absorbé	0,340	0,345

Elles conduisent aux compositions suivantes :

	(1)	(2)
Acide carbonique	0,80	0,91
Oxyde de carbone	33,31	33,76
Hydrogène	1,25	1,70
Azote	64,64	63,63
	100,00	100,00

En faisant passer le gaz du générateur à travers une dissolution d'acétate de plomb, on obtient un dépôt noir très-sensible de sulfure de plomb. En mesurant le gaz qui a traversé la dissolution d'acétate, j'ai recueilli pour $4^{lit},22$ de gaz sec ramené à la température 0 degré, sous la pression $0^{m},760$, une quantité de sulfure de plomb, qui, traitée par l'eau régale, m'a donné :

Sulfate de baryte	gr 0,064	
D'où soufre	0,00883	
Et hydrogène sulfuré sur 100 volumes.		0,16

Cette petite proportion d'hydrogène sulfuré a été absorbée par le premier tube à potasse dans l'analyse du gaz, et son poids a été compté comme acide carbonique; en faisant la correction et prenant la moyenne des deux analyses qui précèdent, on trouve pour la composition du gaz :

Acide carbonique	0,73
Oxyde de carbone	33,54
Hydrogène	1,47
Hydrogène sulfuré	0,16
Azote	64,10
	100,00

Il est probable qu'il existait dans ce gaz du générateur une certaine quantité de soufre à l'état de sulfure de carbone, mais je n'en ai pas déterminé la proportion. J'ai constaté seulement qu'on n'y trouvait pas de soufre libre, en faisant passer les gaz à travers un long tube de verre ; il ne s'est pas condensé de soufre sur les parois de ce tube.

La présence de l'hydrogène sulfuré dans les gaz du générateur est un fait scientifique remarquable, et dont il est difficile de se rendre compte, d'après le peu de stabilité qu'on attribue à l'hydrogène sulfuré. On admet, en effet, que ce gaz est décomposé par la chaleur seule. Ici, on le voit se former sous l'influence d'une température très-élevée, et on ne peut expliquer sa présence que par la réaction de la vapeur d'eau contenue dans l'air atmosphérique sur le sulfure de fer du coke, à une faible distance de la tuyère du générateur. Il est intéressant de rapprocher ce résultat de celui que j'ai indiqué pour les hauts fourneaux, où l'on ne trouve pas dans les gaz une trace de composés sulfureux, sauf dans le voisinage de la tuyère. Cette différence dans les résultats tient bien certainement à la présence, dans le haut fourneau, d'une grande quantité de fer métallique qui absorbe la totalité du soufre. Ce rapprochement montre aussi quel est le procédé qu'il conviendra de suivre pour obtenir des gaz dépouillés de soufre avec des combustibles sulfureux. En mêlant au lit de fusion préparé pour le générateur, soit une certaine quantité de riblons, soit des battitures ou des scories de forges mêlées avec de la chaux, on retiendra tout le soufre en combinaison, soit

dans le laitier à l'état de sulfure de calcium, soit dans la fonte obtenue.

J'aurais désiré pouvoir faire des expériences analogues à celles qui précèdent avec les différents combustibles minéraux, mais le temps dont je pouvais disposer ne m'a pas permis de pousser plus loin ces recherches, dans le cours de cette campagne. Cependant la transformation des divers combustibles en gaz susceptibles d'être employés dans les opérations métallurgiques est une question déjà suffisamment étudiée pour qu'on puisse énoncer quelques principes généraux sur la composition des gaz produits et sur la manière la plus avantageuse d'opérer la transformation. Je vais exposer brièvement ma manière de voir à ce sujet.

Les expériences qui précèdent, celles que j'ai faites antérieurement sur le charbon de bois et le bois en nature (page 476), et sur les gaz des hauts fourneaux (pages 224 et suivantes), ont prouvé [et je dois rappeler ici que ce fait n'avait pas encore été démontré avant mes expériences (1)] qu'en brûlant le charbon en colonne suffisamment épaisse dans un fourneau à cuve, par un courant d'air forcé, on transforme complétement l'oxygène de l'air en oxyde de carbone. La composition des gaz obtenus avec du carbone supposé pur peut être calculée d'avance. Ils renfermeraient : oxyde de carbone, 34,43; azote, 65,57.

Si l'on emploie un combustible qui contienne des parties volatiles, il éprouvera une véritable distillation avant d'arriver dans la zone de combustion. Si la hauteur du générateur de gaz est suffisante, la distillation s'opérera dans une atmosphère formée d'oxyde de carbone et d'azote. La com-

(1) Il était impossible de prouver, par des considérations à priori, que l'oxygène atmosphérique, en traversant une couche épaisse de charbon, devait être complétement changé en oxyde de carbone. Comme la formation de ce gaz produit une absorption de chaleur, et qu'on ignore la température à laquelle elle cesse d'avoir lieu, on ne pouvait pas savoir à l'avance quelle serait la proportion d'acide carbonique changée en oxyde de carbone. L'expérience directe était nécessaire pour décider la question.

position des gaz produits avec les différents combustibles se déduirait donc de celle des gaz dégagés par leur distillation en vases clos, si l'on connaissait en même temps le poids du charbon, résidu de cette distillation, et le volume des gaz qu'elle donne. Il suffirait de transformer le charbon en oxyde de carbone, d'y ajouter l'azote correspondant et les gaz de la distillation. On ramènerait ainsi la détermination de la composition des gaz produits avec les différents combustibles dans des générateurs, à de simples expériences de laboratoire, qui peuvent se faire avec beaucoup plus de facilité que les premières.

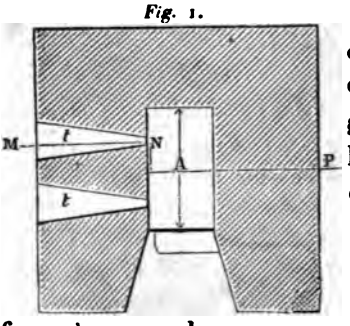
C'est à l'expérience à nous faire connaître la meilleure forme intérieure des générateurs de gaz. L'air devra, dans tous les cas, traverser une épaisseur suffisante de combustible, afin que son oxygène soit complétement changé en oxyde de carbone. La plupart des fourneaux à cuve pourront vraisemblablement servir à cet usage, mais la condition essentielle de leur emploi comme générateur de gaz, c'est que les cendres du combustible s'y fondent complétement. Il suffit d'avoir fait marcher pendant quelques heures un générateur à tuyères, pour se convaincre de l'impossibilité d'obtenir un roulement tant soit peu régulier, sans la fusion complète des résidus de la combustion (1).

Les premiers générateurs de gaz qui aient été établis, et les seuls, à ma connaissance, qui fonctionnent régulièrement en ce moment en France, sont ceux dont on se sert dans les usines de la compagnie d'Audincourt depuis les expériences qui y ont été faites en 1842. Trois générateurs de gaz, ne consommant que des braises et des menus de halle, sont maintenant en roulement continu et régulier dans ces usines. L'un d'eux, établi à Audincourt à la fin

(1) Si le fourneau à cuve avait une très-grande largeur, il ne serait pas absolument nécessaire de fondre les cendres du combustible. Le générateur de gaz de Kœnigshütte (Silésie), sur lequel M. Debette, élève ingénieur des Mines, m'a donné des renseignements précis, se trouve dans ce cas.

de 1842, sert à chauffer un four à tôle, et depuis le mois de septembre 1843, époque à laquelle il a été remis en feu, il a produit en moyenne, par chaque mois de roulement, 30,000 kilogrammes de tôles fines, avec une consommation de 24 hectolitres de fraisil, pesant 432 kilogrammes, par 24 heures. Deux autres générateurs établis, l'un à Audincourt, l'autre à Bourguignon, chauffent au blanc deux fours à réverbère, dans lesquels on soude des trousses destinées à la fabrication de tôles du poids de 300 à 500 kilogrammes. La fabrication des grosses tôles d'Audincourt est entièrement fondée sur l'emploi des générateurs de gaz et des combustibles auparavant sans emploi dans ces usines.

Fig. 1.

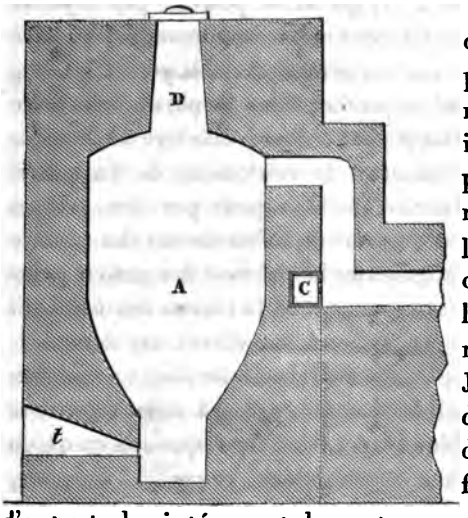


Les fours à souder sont établis comme celui dont j'ai donné le plan (p. 466). Le générateur A, représenté à l'échelle de $0^m,02$ pour mètre en plan à la hauteur des tuyères, *fig.* 1, et en coupe suivant la ligne brisée MNP, *fig.* 2, est accolé au four, de façon à ce que les gaz ne perdent aucune partie de leur chaleur sensible, en arrivant devant la caisse C, qui projette de l'air chauffé à 300 degrés. La forme du générateur est celle d'un petit haut fourneau dont la cuve serait prismatique. On charge le combustible par un cône en briques D de $0^m,90$ de hauteur, qui reste fermé dans l'intervalle de deux charges.

L'air est lancé dans le générateur par deux tuyères t, t' placés du même côté du creuset. On ajoute, pour chaque hectolitre de fraisil, 1 litre de crasses de forges et $0^l,5$ d'argile, qui suffisent pour donner un laitier bien liquide. La consommation en braise et fraisil est de 90 à 100 hectolitres (1,600 à 1,800 kilogrammes) de braise et de fraisil pendant 24 heures. La proportion de fer qu'on soude pendant le

même temps dans chaque four à réverbère est de 3,800 à 4,000 kilogrammes.

Fig. 2.



Je me contente d'indiquer ici, d'après les renseignements que M. Page, ingénieur de la compagnie, a bien voulu me communiquer, les principales circonstances du roulement de ces générateurs de gaz. J'espère pouvoir en donner bientôt une description tout à fait complète. Il sera d'autant plus intéressant de porter ces procédés à la connaissance du public, qu'ils ne sont pas brevetés.

Le générateur à grille, dont j'ai indiqué le principe (p. 452), n'a pas encore été essayé. Son établissement aurait exigé des frais plus considérables que le générateur à tuyères. La chambre à air double porte serait établie de la même manière que l'appareil imaginé par M. Cabrol pour chauffer et désoxygéner partiellement l'air qu'il lance dans les hauts fourneaux. L'emploi de ce générateur pourra présenter des avantages pour des combustibles très-chargés de cendres, dont la fusion serait difficile dans le générateur à tuyères, et peut-être pour des houilles très-grasses. C'est à l'expérience à décider cette question.

L'emploi simultané de la vapeur d'eau et de l'air, comme agents de combustion, dans le générateur, présente l'avantage de donner des gaz plus riches en principes combustibles que l'emploi de l'air seul, et dont la chaleur propre est assez faible, à leur sortie du générateur, pour qu'on

puisse les conduire au loin, sans perte notable de chaleur, et les réchauffer à chaleur perdue avant de les brûler. Mais j'ai montré (p. 334 et 477) qu'on ne pouvait pas injecter cette vapeur à la même hauteur et par les mêmes orifices que l'air atmosphérique dans un générateur à tuyères, à cause du refroidissement qui se produit dans la partie inférieure du foyer et qui, en empêchant d'une manière absolue la fusion des cendres, rendrait le roulement de l'appareil impossible. L'introduction de la vapeur par des orifices particuliers situés à $0^m,40$ ou $0^m,50$ au-dessus des tuyères à air, permettrait d'augmenter la richesse des gaz en principes combustibles, sans empêcher la fusion des cendres. Je ne sache pas que ce système ait encore été essayé.

La possibilité d'appliquer au travail du fer et à d'autres usages, des combustibles jusqu'à présent sans valeur, se trouve maintenant démontrée. Rien ne s'oppose à ce qu'on utilise, dans des appareils semblables à ceux d'Audincourt, des lignites, des houilles terreuses, des anthracites, dont les procédés actuels de combustion ne permettent pas de tirer un bon parti. Le roulement des appareils exige, il est vrai, une force motrice assez considérable pour l'injection de l'air dans le générateur et dans les fours; mais, comme il n'y a pas de tirage à établir, on peut utiliser la totalité de la chaleur sensible des gaz brûlés qui ont traversé la sole du four, et cette chaleur suffirait, et au delà, pour chauffer l'air à lancer sur les gaz et la chaudière à vapeur qui fournirait la force motrice pour la machine soufflante.

XI.

Notice sur les générateurs de gaz des usines d'Audincourt.

J'ai donné dans deux précédents Mémoires la description des expériences qui ont été exécutées en 1841 et

1842, à Audincourt, sur la transformation des divers combustibles en gaz. Ces expériences, entreprises en suite d'une mission qui m'avait été confiée par M. le sous-secrétaire d'Etat des travaux publics, ont eu pour but de déterminer la composition des gaz produits avec les différents combustibles, en employant les divers agents de combustion, et en même temps de rechercher les conditions de forme et de roulement auxquelles devaient satisfaire les générateurs du gaz. Des essais faits en grand, et continués pendant plusieurs jours, avaient donné des résultats assez positifs pour que la compagnie d'Audincourt se décidât à faire tenter l'application régulière de ce système. Aujourd'hui les générateurs de gaz établis par M. Page, ingénieur de la compagnie, pour alimenter des fours à réverbère, fonctionnent avec régularité. Après avoir observé leur roulement dans le courant de l'automne dernier, j'ai cru devoir consigner ici quelques détails sur les dispositions qui ont été adoptées, dispositions sanctionnées par l'expérience, et qui diffèrent assez notablement de celles décrites dans mon précédent travail.

Trois générateurs de gaz ont été établis, deux à l'usine d'Audincourt, l'autre à l'usine de Bourguignon. L'un des générateurs d'Audincourt marche d'une manière continue et alimente un four à réverbère destiné au réchauffage des tôles fines, et dont la température ne s'élève pas au delà du rouge clair. Le second générateur ne fonctionne que par intervalles pour chauffer un four à réverbère à barreaux, quand le gaz du haut fourneau manque.

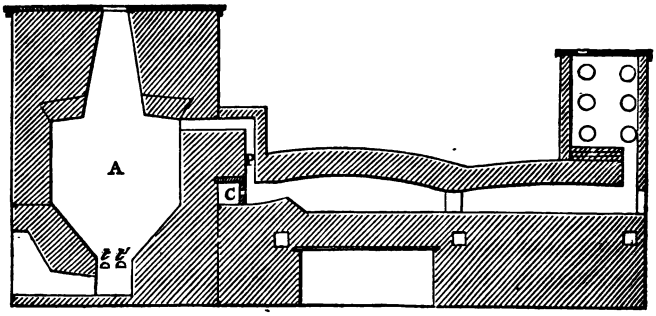
Le générateur de Bourguignon alimente un four à réverbère qui produit des tôles d'une grande dimension. La température de ce four, qui sert à la fois au soudage des trousses et au réchauffage des tôles, est des plus élevées. Après avoir décrit cet appareil, le plus important des trois, je n'aurai que peu de choses à ajouter sur la disposition et le roulement des deux autres.

Générateur de Bourguignon.

Le four à gaz de Bourguignon est représenté ci-dessous en coupe et élévation. Il se compose de deux parties : 1° du générateur A ; 2° du four proprement dit.

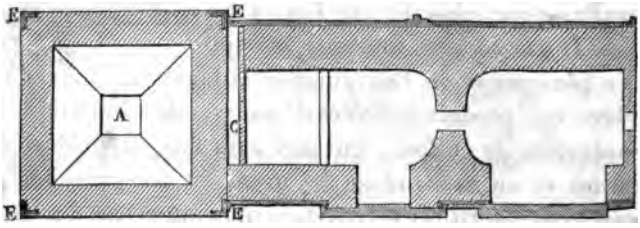
1°. *Du générateur.* — Le générateur A est un véritable fourneau à cuve disposé à la partie inférieure à peu près comme le serait un haut fourneau de petites dimensions. Il reçoit de l'air par deux tuyères opposées, mais non sur le prolongement l'une de l'autre, dont les projections sur la coupe verticale *fig.* 1, sont *t*, *t'*. Ces tuyères ont la forme et les dimensions de celles qu'on emploie dans les

Fig. 1.



feux d'affinerie. Les étalages commencent immédiatement au-dessus des tuyères, et leur forme (*fig.* 1 et 2) est celle

Fig. 2.



d'un tronc de pyramide à base carrée. La cuve du fourneau est prismatique et à base carrée. On peut remarquer au-

dessus de la cuve (*fig.* 1) une partie conique évasée qui sert au chargement du combustible. La partie inférieure du fourneau au-dessous des tuyères est formée par un creuset qui peut s'ouvrir facilement à sa partie antérieure de manière à laisser écouler les matières liquides qu'il contiendrait.

La paroi intérieure du générateur est en briques réfractaires du Montet. La chemise réfractaire a $0^m,11$ d'épaisseur, largeur d'une brique. La chemise extérieure a $0^m,22$ d'épaisseur, longueur d'une brique; elle est en briques communes. La paroi du générateur a donc $0^m,33$ d'épaisseur dans la partie qui correspond à la cuve. Les quatre angles du générateur sont maintenus par quatre équerres en fonte E, E, E, E (*fig.* 2), qui viennent s'engager dans le filet de deux platines en fonte, l'une placée à la base inférieure, l'autre servant de chapeau.

2°. *Description du four.* — Les gaz combustibles passent du générateur dans le four par le conduit PP, de même largeur que le four. Ils arrivent et se brûlent devant la caisse à vent C, formée par des briques réfractaires qui ont été percées de trous au nombre de 30, placées sur deux lignes horizontales. Ces trous ont $0^m,014$ de diamètre. On avait établi d'abord des caisses à vent en tôle et en fonte, mais elles s'oxydaient trop rapidement; les caisses en briques résistent au contraire parfaitement.

Le four à réverbère est à deux soles. Les largets de fer à souder sont placés sur la seconde, pendant que le soudage de la trousse précédente a lieu dans le premier compartiment. Les produits de la combustion s'échappent en partie par la porte, tandis que le reste se rend dans la cheminée pour chauffer les tuyaux de l'appareil où passe l'air destiné à la combustion des gaz. Celui-ci arrive dans la caisse à vent C par l'ouverture disposée à cet effet.

Un marteau en fonte, du poids de 1,000 kilogrammes, comprime les pièces soudées : le manche de ce marteau est

en bois. Il est soulevé par une roue à deux cames, placés au-dessus de lui dans le même plan que la queue du marteau. Il n'y a pas de rabat. Le poids des pièces de tôle que l'on fabrique dans le four ne permettant pas aux ouvriers de les manier sans le secours d'une machine, on a établi une grue qui permet de conduire les pièces du four au marteau et au laminoir. Cette grue supporte une fourche en fer, dont la longueur totale est de 4 mètres, et dont le point de suspension est à 1 mètre de distance de l'extrémité de la partie fourchue. Celle-ci a $0^m,80$ de longueur. Le poids total de la fourche est d'environ 75 kilogrammes.

La fabrication des grosses tôles s'exécute en entier dans le même four à gaz; elle se compose de deux parties : 1° du soudage des trousses; 2° du réchauffage et du laminage des pièces soudées. Ces deux opérations n'exigeant pas la même température ne se font pas immédiatement à la suite l'une de l'autre. La fin de chaque semaine est ordinairement consacrée au réchauffage et au laminage des pièces soudées.

On peut évaluer à 2,000 francs la dépense nécessaire pour l'établissement d'un four à gaz muni d'un générateur et disposé comme celui de Bourguignon, d'après le devis suivant dont les éléments m'ont été fournis par M. Page.

Devis d'un four à gaz.

	Quantités.	Prix.	Sommes.
Journées de maçons	60	2,50 fr.	150,00
Journées de manœuvres	30	1,50	45,00
Briques réfractaires	3207	17,00 $\frac{0}{0}$	545,00
Briques rouges	5834	30,00 $\frac{0}{00}$	175,00
Poids des 4 équerres fixées contre les angles du générateur	900 k.	20,00 $\frac{0}{00}$	180,00
Cadre du bas	500	20,00 $\frac{0}{00}$	100,00
Platine recouvrant le dessus du générateur	560	20,00	112,00
Bavette des fours	612	20,00	122,40
Les deux platines des fours	600	20,00	120,00

Pièce qui se fixe contre une platine pour former la porte....	400	20,00	fr.	80,00
Les deux portes.....	100	20,00		20,00
Platine de la conduite de gaz...	55	20,00		11,50
Platine recouvrant l'appareil à air chaud.....	140	20,00		28,00
Tuyau de la conduite d'air chaud depuis l'appareil à la caisse..	180	20,00		36,00
Six brides pour consolider l'appareil.....	60	20,00		12,00
Poids des deux balanciers pour ouvrir les portes. Fer.....	20	1,00 le kil.		20,00
Poids des deux fourchettes supportant les balanciers et des boutons qui les fixent contre la platine.....	15	1,00		15,00
Poids des 3 boulons qui unissent les platines du four.....	15	1,00		15,00
Poids des 6 boulons qui unissent les brides de l'appareil à air chaud.....	5	1,00		5,00
Tuyaux de l'appareil à air chaud.	375	20,00 $\frac{0}{00}$		75,00
Total.....				1866,90
Le $\frac{1}{15}$ de frais imprévus...				124,46
Total général.....				1991,36

Fabrication des largets de fer brut. — Les pièces qui servent à former les trousses sont des largets de fer brut qu'on fabrique dans le feu d'affinerie comtois. Ces pièces, dont le poids est compris entre 100 et 150 kilogrammes, s'obtiennent de la manière suivante :

On sait que la fabrication du fer dans le foyer comtois se compose de deux opérations qui sont l'affinage proprement dit et le réchauffage des deux lopins obtenus par le battage et la division de la loupe sous le marteau, réchauffage qui s'opère en même temps que le commencement de l'affinage

de la pièce suivante. La fabrication des largets de fer brut ou écru destinés à la confection de la tôle, se compose de l'affinage seulement. Chaque loupe ne fournit qu'un seul larget qu'on ne reporte plus au feu d'affinerie, en sorte que l'ouvrier peut accélérer l'affinage et diminuer la durée de l'opération, et par conséquent la consommation en charbon dans une certaine mesure. Les consommations en fonte et en charbon relatives à la fabrication du fer écru, n'étaient pas encore parfaitement établies lors de mon passage à Audincourt à cause du défaut d'habitude des ouvriers. La consommation en fonte ne variait pas beaucoup d'un feu à l'autre; elle était d'environ 1,150 par 1,000 kilogrammes de fer écru; la consommation en charbon variait davantage. Pour la plupart des ouvriers elle ne dépassait pas 840 kilogrammes aux 1,000 kilogrammes de produit. La consommation moyenne d'Audincourt, pour obtenir 1,000 kilogrammes de fer marchand en grosses barres, est de 1,380 de fonte et de 56 hectolitres de charbon.

Mise en feu du four et soudage. — Quand le générateur est neuf, on le sèche pendant quelques jours en entretenant du feu dans le creuset, puis on le remplit de braise et l'on donne le vent sous une faible pression d'abord, puis on l'augmente progressivement jusqu'à $0^m,05$ de mercure; le diamètre des buses est de $0^m,03$. Aussitôt que les gaz combustibles arrivent dans le four, on donne le vent dans la caisse à air C, et on en règle la proportion au moyen d'un registre à glissoir placé sur la conduite. On se guide pour cela d'après l'aspect et la couleur de la flamme qui sort entre la porte en fonte et la platine du four. Une flamme bleue et longue indique la présence de l'oxyde de carbone. Une flamme courte et jaunâtre montre au contraire qu'il y a excès d'air (1).

---

(1) Voyez les analyses que j'ai faites des gaz brûlés pris sur la sole d'un four à réverbère, dans des circonstances tout à fait semblables (p. 472).

Quatre heures après la mise en feu du four, on introduit dans le compartiment soudant les largets de fer écru qui se trouvaient depuis une heure sur la seconde sole. Les largets se trouvaient isolés dans le compartiment à chaleur perdue; on les superpose en les introduisant dans le compartiment soudant. On superpose deux, trois, ou même quatre largets de 100 à 150 kilogrammes l'un, suivant le poids de la pièce de tôle qu'on veut obtenir; les pièces les plus ordinaires pesant entre 200 et 300 kilogrammes s'obtiennent avec deux largets seulement. La trousse est placée sur une brique qui est posée à plat sur la sole du four faite en sable réfractaire.

Au moment où l'on place le fer dans le compartiment soudant, on charge le générateur avec de la braise, de façon à remplir le cône supérieur dont on ferme exactement l'orifice avec un couvercle en fonte à rebord; on ajoute par chaque hectolitre de braise un litre de terre argileuse et un litre de scories de forges; ces proportions varient un peu, du reste, suivant la pureté du combustible. Il convient d'ajouter que les charbons employés à l'usine de Bourguignon proviennent exclusivement de forêts situées sur les terrains calcaires; la pierraille, qui se trouve mêlée dans les menus, exige donc un fondant argileux. D'autres combustibles devraient être mélangés avec un fondant autrement composé, de façon à avoir dans tous les cas un laitier suffisamment fluide.

La disposition qui a été adoptée pour le chargement du combustible permet aux gaz de se rassembler, avant de se rendre au four, dans l'espace vide compris entre la paroi supérieure du générateur et la surface conique suivant laquelle se dispose le charbon en sortant du cône de chargement; la vitesse des gaz diminuant beaucoup dans cet espace, il en résulte qu'il n'y a que très-peu de parcelles charbonneuses entraînées jusque sur la sole du four.

Il faut deux heures pour chauffer au blanc le premier

de la pièce suivante. La fabrication des lar[illegible] alors ou écru destinés à la confection de la t[illegible] à trois l'affinage seulement. Chaque loupe r[illegible] ate, et sa larget qu'on ne reporte plus au f[illegible] telage, la que l'ouvrier peut accélérer l'affi[illegible] a repla[illegible]ant de l'opération, et par conséque[illegible] er une p[illegible]si- bon dans une certaine mesu[illegible] ier chauffa[illegible] la et en charbon relatives à la [illegible] ait exposées à pas encore parfaitement [illegible] ue dure vingt à ving[illegible] dincourt à cause du d[illegible] e sous le marteau et on l[illegible] sommation en fon[illegible] dant environ dix minutes, de l'autre; elle était [illegible] isme rectangulaire aplati dont les di- fer écru; la co[illegible] suivant le poids de la pièce et les dimen- Pour la plu[illegible] qu'elle fournira. grammes [illegible] mation [illegible] second forgeage on arrête le vent du généra- gram[illegible] recharge en braise; on en introduit à la fois de de [illegible] hectolitres. Tout chargement doit être évité pendant [illegible] à cause du refroidissement que l'introduction d'un combustible froid dans le générateur produirait dans le four à réverbère. On prend en même temps les largets de fer brut qui se trouvent chauffés au rouge à la chaleur perdue, et on les superpose dans le compartiment soudant. On remplace ensuite ces largets par d'autres dans le deuxième compartiment du four, et on recommence à donner le vent.

Quand le four est en plein roulement, le temps du chauffage est de beaucoup réduit. Pour une pièce de 250 kilogrammes on compte environ cinquante minutes pour la première chaude, vingt minutes pour la seconde, et vingt à vingt-cinq minutes pour le défournement et le martelage; on arrive souvent à faire seize pièces en vingt-quatre heures; la durée de l'opération est au reste bien loin d'être proportionnelle au poids des pièces. Ainsi des trousses pour tôles de 400 à 500 kilogrammes sont soudées et martelées en deux heures et demie.

teur fait écouler de temps en temps, par un simple
rd, les scories qui remplissent le creuset du
scories sont très-liquides. Refroidies, elles
verre à bouteille. On obtient souvent
u de fonte blanche très-cassante, qui
n partielle des scories de forges em-

i produit la combustion des gaz
ortée à 300 degrés, mais on s'ar-
e dépasse pas 150 degrés; en voici la

l air a été fortement échauffé, la température du
s'élève tellement, qu'il est presque impossible d'empêcher, au bout de quelques jours de roulement, le ramollissement et la chute de la voûte, bien qu'elle soit formée des briques les plus réfractaires. En général, les fours à gaz se détériorent beaucoup plus vite que les fours à tirage naturel. La combustion s'opérant dans leur intérieur sous une pression supérieure à la pression atmosphérique, les gaz tendent constamment à s'échapper au dehors par les joints des briques, et la moindre fissure s'élargit bientôt par leur passage, de façon à produire la chute de la voûte, si l'on n'y apporte un prompt remède. La conservation des voûtes a présenté d'assez grandes difficultés à Bourguignon, dans les premiers temps du roulement du four à gaz. On arrive maintenant à faire durer la voûte pendant quinze jours, sans qu'elle ait besoin de réparations. Comme le four est arrêté à la fin de chaque semaine, ces réparations ne nuisent pas au travail. C'est dans la partie comprise entre la caisse à vent et la première sole que les dégradations ont surtout lieu. Quelques briques réfractaires et quelques heures de travail d'un maçon suffisent à la réparation du dommage.

Quand on arrête, à la fin de chaque semaine, le roulement du four, on remplit le générateur avec de la braise,

paquet qui a été placé dans le compartiment soudant du four, immédiatement après la mise en feu. On porte alors la pièce sous le marteau et on la bat pendant deux à trois minutes; le marteau bat cinquante coups par minute, et sa levée est de $0^m,70$ à $0^m,75$. Après ce premier martelage, la pièce est reportée au four, mais on a soin, en la replaçant sur la brique qui sert de support, de lui donner une position inverse de celle qu'elle avait lors du premier chauffage, afin que toutes ses faces soient successivement exposées à la même température; cette seconde chaude dure vingt à vingt-cinq minutes. On reporte la pièce sous le marteau et on la bat sur toutes les faces pendant environ dix minutes, de façon à produire un prisme rectangulaire aplati dont les dimensions varient suivant le poids de la pièce et les dimensions de la tôle qu'elle fournira.

Pendant ce second forgeage on arrête le vent du générateur et on le recharge en braise; on en introduit à la fois de 5 à 7 hectolitres. Tout chargement doit être évité pendant le soudage à cause du refroidissement que l'introduction d'un combustible froid dans le générateur produirait dans le four à réverbère. On prend en même temps les largets de fer brut qui se trouvent chauffés au rouge à la chaleur perdue, et on les superpose dans le compartiment soudant. On remplace ensuite ces largets par d'autres dans le deuxième compartiment du four, et on recommence à donner le vent.

Quand le four est en plein roulement, le temps du chauffage est de beaucoup réduit. Pour une pièce de 250 kilogrammes on compte environ cinquante minutes pour la première chaude, vingt minutes pour la seconde, et vingt à vingt-cinq minutes pour le défournement et le martelage; on arrive souvent à faire seize pièces en vingt-quatre heures; la durée de l'opération est au reste bien loin d'être proportionnelle au poids des pièces. Ainsi des trousses pour tôles de 400 à 500 kilogrammes sont soudées et martelées en deux heures et demie.

Le chauffeur fait écouler de temps en temps, par un simple coup de ringard, les scories qui remplissent le creuset du générateur. Ces scories sont très-liquides. Refroidies, elles ont la couleur du verre à bouteille. On obtient souvent avec les scories un peu de fonte blanche très-cassante, qui provient d'une réduction partielle des scories de forges employées comme fondant.

La température de l'air qui produit la combustion des gaz pourrait être facilement portée à 300 degrés, mais on s'arrange pour qu'elle ne dépasse pas 150 degrés; en voici la raison :

Quand l'air a été fortement échauffé, la température du four s'élève tellement, qu'il est presque impossible d'empêcher, au bout de quelques jours de roulement, le ramollissement et la chute de la voûte, bien qu'elle soit formée des briques les plus réfractaires. En général, les fours à gaz se détériorent beaucoup plus vite que les fours à tirage naturel. La combustion s'opérant dans leur intérieur sous une pression supérieure à la pression atmosphérique, les gaz tendent constamment à s'échapper au dehors par les joints des briques, et la moindre fissure s'élargit bientôt par leur passage, de façon à produire la chute de la voûte, si l'on n'y apporte un prompt remède. La conservation des voûtes a présenté d'assez grandes difficultés à Bourguignon, dans les premiers temps du roulement du four à gaz. On arrive maintenant à faire durer la voûte pendant quinze jours, sans qu'elle ait besoin de réparations. Comme le four est arrêté à la fin de chaque semaine, ces réparations ne nuisent pas au travail. C'est dans la partie comprise entre la caisse à vent et la première sole que les dégradations ont surtout lieu. Quelques briques réfractaires et quelques heures de travail d'un maçon suffisent à la réparation du dommage.

Quand on arrête, à la fin de chaque semaine, le roulement du four, on remplit le générateur avec de la braise,

on bouche les tuyères et l'avant-creuset, et on l'abandonne à lui-même jusqu'à la reprise du travail. Le générateur de Bourguignon marchait depuis quatre mois avec des intervalles de chômage, sans avoir eu besoin de réparations de quelque importance.

Le service du four pendant le soudage se fait par un chauffeur, six hommes et un enfant en tournée pendant douze heures. M. Page pense que deux des six aides pourraient être supprimés sans inconvénient.

Pour obtenir 1,000 kilogrammes de largets soudés, il faut de 1,170 à 1,180 de fer brut, qui correspondent eux-mêmes, d'après ce qu'on a vu plus haut, à 1,350 ou 1,360 de fonte. Ce nombre est sensiblement égal à celui qui représente la consommation en fonte d'un feu d'affinerie pour obtenir 1,000 kilogrammes de fer forgé en grosses barres.

La consommation en braise est de 80 à 100 hectolitres par vingt-quatre heures (1,440 à 1,800 kilogrammes); rapportée au quintal de produit, cette consommation serait d'autant plus faible, que les dimensions des pièces seraient plus considérables. On fait facilement douze pièces de 250 kilogrammes en vingt-quatre heures, et l'on peut admettre que la consommation moyenne en braise est de 500 kilogrammes pour 1,000 kilogrammes de fer soudé.

Réchauffage et laminage de la tôle. — Cette opération s'exécute le vendredi et le samedi sur tous les largets soudés dans le cours de la semaine.

On place le plus souvent deux pièces à la fois dans chacun des compartiments du four. Les pièces qui ont séjourné pendant trois quarts d'heure sur la seconde sole sont transportées sur la première, où elles restent encore une demi-heure avant d'arriver à la température nécessaire pour le laminage, qui s'élève presque jusqu'au blanc soudant. Les pièces chaudes sont conduites au moyen de la grue jusqu'au laminoir à tôle, où on les termine ordinairement sans avoir besoin de les rapporter au four. Le laminage des deux mor-

ceaux dure à peu près vingt minutes. Pendant qu'il se termine, on fait passer les pièces de la seconde sole sur la première, on en met d'autres dans le second compartiment, et on recharge le générateur. Cette opération s'exécute environ tous les cinq quarts d'heure.

Le réchauffage n'occasionne pas de déchet sensible sur le poids du fer obtenu, mais les rognures qu'on détache à la cisaille des pièces de tôle représentent 15 à 18 pour 100 du poids total. La production journalière du four est de 8,000 à 9,000 kilogrammes.

Le combustible qu'on emploie dans cette opération est un mélange de braise et de fraisil qu'on prépare avec les résidus des halles, en les tamisant sur un crible dont les mailles ont $0^m,006$ de côté, afin d'en séparer les poussières; on en consomme habituellement 15 hectolitres (270 kilogrammes) aux 1,000 kilogrammes de tôle fabriquée.

Il faut, par tournée, un chauffeur, deux lamineurs, six aides et un enfant, pour le service du four et du laminoir.

Les tôles soudées de Bourguignon sont de qualité supérieure, et l'examen le plus rigoureux ne peut y faire découvrir ni pailles ni défauts. Elles ont été jusqu'ici exclusivement employées par les fabricants de chaudières à vapeur d'Alsace.

Générateur de gaz d'Audincourt.

Le seul générateur de gaz que j'ai vu fonctionner à l'usine d'Audincourt sert, comme je l'ai déjà indiqué, à chauffer un four destiné à la fabrication des tôles fines pour fer noir et fer blanc. Le générateur est établi à très-peu près comme celui de Bourguignon; seulement, les deux tuyères à air sont placées du même côté, et sa largeur au ventre n'est que de 1 mètre. Le four placé à la suite a trois portes qui correspondent chacune à un compartiment particulier. Il est disposé de la même manière que les fours à tôle chauffés dans la même usine à la chaleur perdue des feux d'affinerie.

Les produits de la combustion, en quittant la dernière sole, chauffent l'appareil où passe l'air qui sera projeté sur les gaz, appareil construit tout à fait comme celui du four de Bourguignon.

Le combustible qu'on brûle dans ce générateur est du fraisil tamisé sur un crible dont les mailles ont $0^m,006$ de côté. On a reconnu qu'on pouvait ici se dispenser d'ajouter des fondants, et qu'il en résultait une économie notable sur la consommation du combustible. Le creuset et l'ouvrage du générateur se remplissent de scories mal fondues, et les tuyères deviennent bientôt tout à fait noires. Mais comme la consommation en fraisil ne dépasse par 30 hectolitres par vingt-quatre heures, le volume des scories produites n'est pas assez considérable pour qu'on soit obligé de suspendre fréquemment le travail pour les enlever. Il arrive ordinairement qu'on n'enlève les scories qu'à la fin de la semaine, lorsqu'on arrête le four à tôle.

La température du four ne doit pas dépasser le rouge cerise, même dans le premier compartiment, et on règle en conséquence la quantité de gaz que doit fournir le générateur. Le travail de la tôle s'y fait exactement de la même manière que dans les fours placés à la suite des foyers d'affinerie. Seulement ici, le travail est plus régulier, plus continu, parce qu'on maintient facilement le four à une température constante, ce qui n'arrive jamais avec les fours chauffés par les gaz des feux d'affinerie au charbon de bois, gaz dont la composition varie beaucoup aux diverses périodes de l'affinage.

On règle la quantité d'air comburant de façon à ce que l'oxyde de carbone soit en excès dans les produits de la combustion, et qu'il sorte toujours une longue flamme bleue par les pertes. Le déchet sur la tôle s'en trouve diminué.

La production mensuelle du four à tôle avec générateur est de 24,000 kilogrammes qui correspondent à vingt-quatre ou ving-cinq jours de roulement. Le déchet sur le fer est de

43 pour 1000, non compris les rognures. La consommation en fraisil a été de 31 hectolitres pesant 560 kilogrammes, pour 1,000 kilogrammes de tôle produite.

Le four à tôle sur lequel je viens de donner quelques indications a été établi immédiatement après les expériences qui ont été exécutées à Audincourt dans l'automne de 1842, et depuis cette époque il a fonctionné presque sans interruption. Quelques explosions ont eu lieu dans le générateur, mais seulement au commencement de sa mise en roulement. Ces explosions, qui s'étaient déjà présentées pendant les expériences de 1842 (p. 475), tenaient, comme je l'avais indiqué, à ce que le fraisil avait été employé mouillé. Avec des fraisils recueillis par un temps sec, elles ne se sont jamais reproduites.

Les indications qui précèdent sur le roulement des fours à gaz d'Audincourt et de Bourguignon suffisent pour montrer que ces procédés sont devenus dans ces usines d'un emploi tout à fait manufacturier et qu'ils donnent d'importants résultats. Ces usines sont encore, à ma connaissance, les seules en France où des procédés *pour la transformation des combustibles en gaz* soient appliqués avec régularité. La compagnie d'Audincourt n'a pas pris de brevet d'invention, en sorte que les procedés qui viennent d'être décrits, peuvent être considérés comme étant dans le domaine public. Depuis près de deux ans, j'ai signalé leur emploi dans les usines de la compagnie, et cet emploi a continué depuis cette époque sans le moindre empêchement de la part de personne. Je me contente d'indiquer ce fait, qui me paraît rendre inutile toute discussion relative à l'invention et à la propriété de ces procédés et répondre suffisamment à certaines assertions.

Je terminerai cette description par quelques considérations générales sur l'emploi des gaz dans les opérations des arts et sur la convenance de substituer leur combustion à celle des solides.

Le seul procédé de transformation des combustibles en gaz

qui ait donné jusqu'à présent des résultats manufacturiers, soit en France, soit à l'étranger, consiste dans l'introduction de l'air à travers une couche épaisse de combustible. L'épaisseur de cette couche peut, au reste, être de beaucoup réduite, puisqu'il suffit d'une hauteur de $0^m,30$ à $0^m,40$ de charbon pour transformer complétement l'oxygène de l'air en oxyde de carbone. Pour des combustibles fixes ou ne perdant que peu de produits volatils à la calcination, comme le charbon de bois, le coke ou l'anthracite, il y a évidemment avantage à ce que le générateur soit accolé au four à réverbère, afin que la chaleur sensible des gaz produits ne se perde pas par les conduites avant leur arrivée au four. Cette quantité de chaleur est considérable : j'ai montré, dans un précédent Mémoire, qu'on pouvait évaluer au moins à 500 ou 600 degrés la température des gaz sortants, en supposant que le combustible arrive d'une manière continue dans ce générateur. Avec le système suivi à Bourguignon de ne charger le combustible qu'à des intervalles de temps éloignés les uns des autres, il est évident que la température propre des gaz sortant du générateur deviendra d'autant plus élevée, qu'on sera plus loin du moment où le chargement du combustible aura eu lieu. Il en résultera ce grand avantage, que la *température de combustion* des gaz s'élèvera de plus en plus à mesure que le fer s'échauffera davantage sur la sole du four.

La température à laquelle on peut atteindre dans le four à gaz de Bourguignon, est beaucoup plus élevée que celle produite dans les fours alimentés par les gaz des hauts fourneaux, et la nature des deux combustibles en rend bien raison ; en effet, on explique parfaitement cette différence par leur composition respective déduite (1) de trois analyses faites en 1842 sur des prises de gaz effectuées sur le générateur d'Audincourt, et (2) de mon travail sur la composi-

(1) Moyenne des analyses de gaz du générateur d'Audincourt, en 1842.

(2) Moyenne de cinq analyses de gaz pris au gueulard du fourneau de Clerval.

tion des gaz qui s'échappent du gueulard du haut fourneau de Clerval (p. 280).

	(1) Gaz du générateur.	(2) Gaz des hauts fourneaux.
Acide carbonique.....	0,5	12,9
Oxyde de carbone.....	33,3	23,5
Hydrogène.....	2,8	5,8
Azote.....	63,4	57,8
	100,0	100,0

Ainsi le gaz du générateur contient 36,1 pour 100 de principes combustibles, tandis que celui du haut fourneau n'en renferme que 28,3 : celui-ci contient en outre, à sa sortie du gueulard, une proportion de vapeur d'eau qui correspond en moyenne aux 12 pour 100 du volume du gaz sec, et la présence de cette vapeur abaisserait beaucoup la température de combustion, si l'on ne la condensait pas en partie avant de faire arriver les gaz au four. Enfin ceux-ci sont froids en arrivant au four, et on ne peut guère les chauffer à plus de 200 degrés à chaleur perdue, tandis que les gaz du générateur ont une température très-élevée.

La comparaison qui précède explique bien les difficultés qu'on a éprouvées et qu'on éprouve encore pour appliquer d'une manière continue et régulière les gaz des hauts fourneaux au charbon de bois (1) à l'alimentation des fours à réverbère à haute température. Bien que la température du four à puddler soit notablement inférieure à celle des fours de soudage, il semble, d'après le peu de succès d'essais entrepris dans plusieurs usines, que la température de combustion des gaz pris près du gueulard ne soit pas suffisante pour qu'on les emploie à l'alimentation régulière d'un four à puddler; le faible déchet qu'on obtient généralement dans

(1) Les gaz des hauts fourneaux au coke, surtout quand ils sont pris à une certaine distance du gueulard, ont une composition qui se rapproche beaucoup de celle des gaz du générateur.

le puddlage au gaz des hauts fourneaux semble également annoncer que la température des fours n'est pas assez élevée. Il convient pourtant de dire que si l'on consommait dans le fourneau beaucoup plus de charbon aux 1,500 kilogrammes de fonte que l'on n'en consommait au fourneau de Clerval, on aurait des gaz dont la composition et la température de combustion se rapprocheraient de celles des gaz du générateur; mais on conçoit qu'il y aurait un grand inconvénient à faire dépendre le bon roulement du four à gaz d'un mauvais roulement du fourneau.

Les combustibles qui perdent beaucoup de produits volatils à la distillation ont aussi été essayés dans des générateurs de gaz. Un Mémoire intéressant de M. Debette, publié récemment dans les *Annales des Mines*, a fait connaître les résultats obtenus en Prusse et en Styrie par la transformation de la houille et des lignites terreux en gaz combustibles. La disposition du générateur de Kœnigshütte (Prusse), par rapport au four qu'il alimente, présente avec l'appareil de Bourguignon, cette analogie que le générateur est aussi accolé au four à réverbère. Les générateurs de Saint-Stephan (Styrie), qui consommaient du lignite, étaient au contraire isolés du four. La disposition la plus convenable dépend de la nature du combustible. Quand, en effet, on produit des gaz en faisant traverser une couche épaisse de combustible par un courant d'air forcé, il y a dans le générateur deux zones très-distinctes : la première, qui se trouve dans le voisinage des tuyères, est la zone de combustion, et l'expérience a prouvé que le combustible y arrivait toujours carbonisé, et que l'oxygène de l'air s'y transformait complétement en oxyde de carbone. La seconde zone est celle de distillation dans laquelle le combustible perd toutes les parties volatiles qu'il contenait; cette distillation s'opère dans un courant de gaz saturé de carbone, et par conséquent aucun des produits qu'elle fournit ne se brûle dans le générateur. Si le combustible a un pouvoir calorifique élevé,

comme la houille grasse par exemple, les produits de la distillation entraînés avec le mélange d'oxyde de carbone et d'azote qui provient de la partie inférieure du générateur sont presque tous combustibles, et il n'y aurait pas d'avantage à condenser les produits liquides avant d'introduire les gaz dans le four. Si, au contraire, il s'agit de combustibles, comme le bois, la tourbe, les lignites, qui perdent une fraction considérable de leur poids à la distillation, les gaz sortant du générateur entraîneront avec eux une proportion considérable de produits liquides, formés en grande partie d'eau, et dont le mélange avec les gaz combustibles abaisserait nécessairement beaucoup la température de combustion. Il est donc indispensable, si l'on veut obtenir de hautes températures avec des générateurs alimentés avec des combustibles analogues au bois ou à la tourbe, de séparer les gaz des liquides en condensant ceux-ci. Le générateur devra donc dans ce cas être placé à une certaine distance des appareils de combustion. La condensation des vapeurs ne présenterait pas de difficultés : on l'exécuterait comme on le fait déjà pour les gaz des hauts fourneaux que l'on dépouille ainsi de la majeure partie de la vapeur d'eau. Les gaz obtenus avec le bois cru renferment 43 pour 100 de principes combustibles, oxyde de carbone et hydrogène, notablement plus que ceux formés par la braise. En les réchauffant à 300 degrés à la chaleur perdue du four, après la condensation des liquides et les brûlant par un courant d'air chaud et comprimé, il est hors de doute que l'on arriverait à produire les plus hautes températures aussi facilement qu'avec le charbon. La tourbe et les lignites, traités de la même manière que le bois, donneraient bien certainement les mêmes résultats.

La forme des générateurs employés a été jusqu'ici très-variée. Les générateurs de Bourguignon, par leur durée et la facilité avec laquelle on les conduit, me paraissent pouvoir servir à transformer la plupart des combustibles en

gaz. Il est probable qu'on pourrait même réduire beaucoup la hauteur du combustible au-dessus des tuyères, et par conséquent diminuer la pression du vent et la dépense de force pour le roulement du générateur. Nous avons vu, en effet, qu'il suffisait de $0^m,30$ d'épaisseur de charbon pour changer l'oxygène de l'air en oxyde de carbone. Avec 1 mètre, au maximum, d'épaisseur de combustible au-dessus des tuyères, on atteindrait sans doute le même but qu'avec le mode actuel et avec une moindre dépense de force motrice pour l'injection de l'air. Il est possible cependant que pour des combustibles ramollissables, comme les houilles grasses, l'emploi d'un générateur à grille soit préférable à celui d'un générateur à tuyères. M. Detmold de Londres a pris récemment en Angleterre un brevet pour adapter ce système aux fours à puddler et à réchauffer (1). La disposition des appareils est à très-peu près la même que celle que j'avais proposée d'abord, dans mon Mémoire sur la composition des gaz des hauts fourneaux (p. 452).

M. Detmold annonce que l'emploi des fours à réverbère avec générateurs produit une économie de combustible avec une diminution dans les déchets.

XII.

Note sur les procédés de M. Sire pour la fabrication du fer au moyen des gaz des hauts fourneaux.

M. Victor Sire, actuellement employé aux usines de Clerval, m'a communiqué un brevet d'invention de 15 ans, qui lui a été accordé le 31 octobre 1836, pour un système complet de fabrication du fer au moyen du gaz des hauts fourneaux. Ce système n'ayant pas été appliqué dans l'an-

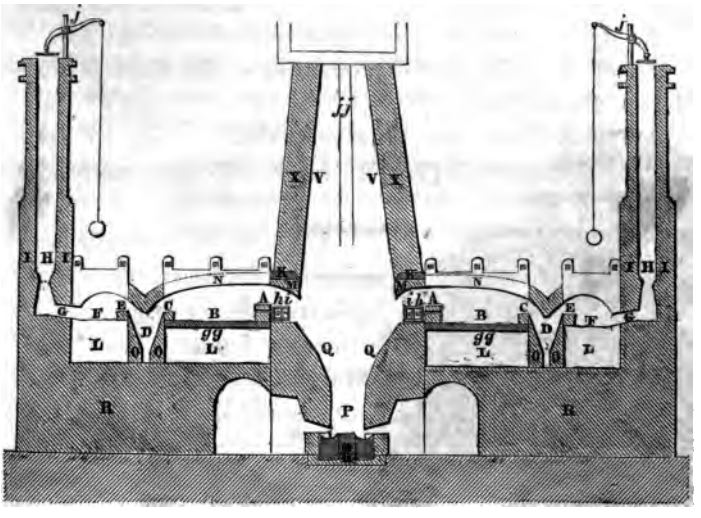
(1) *Journal des Usines*, par M. Viollet, novembre 1844, p. 219.

née qui a suivi l'obtention du brevet, les procédés qui y sont décrits tombent dans le domaine public, en vertu de la législation sur la matière. Il sera sans doute intéressant pour les maîtres de forges de comparer les appareils et les indications de M. Sire, avec les procédés appliqués en Allemagne et en France, tous postérieurement à la date du brevet de M. Sire (1), et cette publication permettra d'attribuer à ce dernier la part qui lui revient dans cette importante découverte.

Les *fig.* 1, 2, 3, sont la copie exacte du plan annexé au brevet de M. Sire. On a reproduit également ci-après le titre et la légende de ce plan.

« Haut fourneau et fours à la suite, pour la fusion du

Fig. 1.

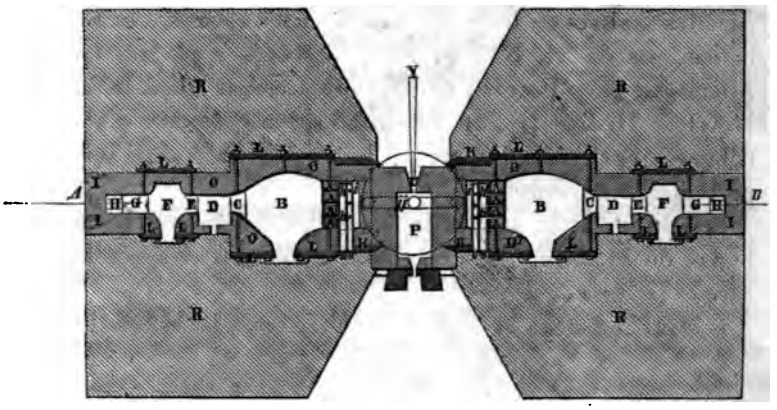


» mincrai de fer et pour la fabrication du fer en barres
» avec la chaleur de la flamme et des gaz combustibles qui

(1) D'après M. Delesse, les premiers essais de M. Faber Dufaur, dans l'usine royale de Wasseralfingen, remontent à la fin de 1837. Les résultats obtenus en France, à l'usine de Treveray, ne datent que de l'année 1841.

» sortiront du fourneau projeté par le sieur Louis-Victor
» Sire. »

Fig. 2.



La *fig.* 1 représente une coupe verticale suivant AB.

La *fig.* 2 est le plan du fourneau et des fours pris au-dessus des étalages.

La *fig.* 3 donne une coupe verticale.

Les dessins sont à l'échelle de $0^m,0066$ pour mètre.

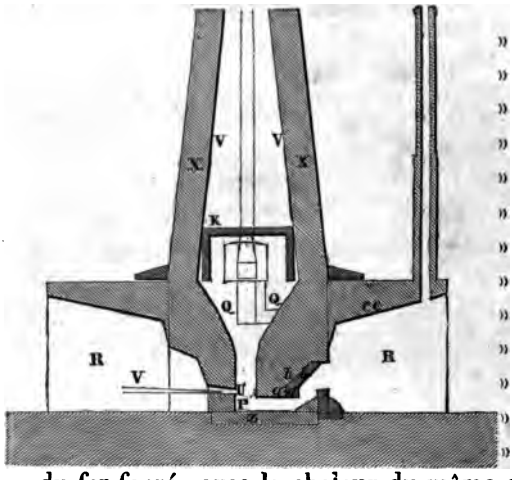
LÉGENDE.

« A. Ponts ou autels à la naissance des fours.
» B. Fours destinés à la fabrication du fer forgé.
» C. Ponts ou autels de derrière des fours.
» D. Chio pour l'écoulement du laitier.
» E. Ponts ou autels des petits fours.
» F. Fours destinés à l'emploi qu'on jugera le plus convenable, les dimensions de ces fours pouvant être augmentées à volonté.
» G. Conduits de la flamme des fours aux cheminées.
» H. Intérieur des cheminées des fours.
» I. Maçonnerie des cheminées.
» J. Registres destinés à régler la chaleur dans les fours.
» K. Cadres en fonte enveloppant les voûtes des autels A.

» L. Plaques en fonte boulonnées soutenant la maçonne-
» rie des fours.
» M. Voûtes en briques des autels.
» N. Voûtes en briques et portes en fonte des fours.
» O. Maçonnerie des fours.
» P. Ouvrage et creuset du haut fourneau.
» Q. Étalage du haut fourneau.
» R. Masse du haut fourneau.
» S. Dame en fonte.
» T. Ouverture par laquelle on coulera la fonte dans un
» moule ou dans une poche pour la transporter
» avec une grue dans les fours.
» U. Tuyère.
» V. Chemise du haut fourneau.
» X. Maçonnerie de la chemise cerclée en fer.
» Y. Buse.
» Z. Fond du fourneau.
» *aa*. Tympe en fer forgé.
» *bb*. Tacqueret en fonte.
» *cc*. Voûte des embrasures de la masse pour le travail de
» la soufflerie.
» *dd*. Chemise du gueulard.
» *ee*. Plate-forme en fonte entourant la base de la chemise
» pour empêcher l'écartement.
» *ff*. Autel devant la dame.
» *gg*. Soles en fonte des fours puddlings. Ces soles peuvent
» être parfaitement planes ou concaves dans le
» milieu.
» *hh*. Tuyau dans lequel on introduira de l'air pour le
» projeter sur la fonte liquide qu'on soumettra à
» l'affinage.
» *ii*. Tuyau duquel il sortira de l'air pour réduire les gaz.
» *jj*. Tuyau d'évaporation. »

Le Mémoire descriptif joint au brevet est ainsi conçu :

Fig. 3.



« Ce haut fourneau diffère des » hauts fourneaux à traiter » des mines de » fer qui fonctionnent dans » les diverses usines de France » et de l'étranger, en ce qu'à » celui-ci sont adaptés des fours » pour l'affinage » du fer forgé, avec la chaleur du même combustible qui » met en fusion le minerai du fer, soit qu'on emploie dans » le haut fourneau pour la fusion du minerai, du bois, » du charbon de bois, de la houille, du coke ou enfin du » charbon de tourbe.

» Tel qu'il est désigné ci-dessus, l'objet principal pour » lequel on réclame pour quinze ans un brevet d'invention, » de perfectionnement et d'importation, est la fabrication » du fer forgé avec la chaleur de la flamme et des gaz combustibles qui sortiront du haut fourneau. Cette chaleur » sera prise à la hauteur que les différents combustibles » exigeront, et les opérations de l'affinage se feront dans » un ou plusieurs fours dont les formes et les dimensions » seront déterminées par les localités et la nature de la » fonte liquide ou solide qu'on soumettra à la décarburation et à l'affinage :

» Soit que la puissance du cours d'eau ou force motrice » permette, en donnant de plus grandes dimensions au » haut fourneau, d'augmenter le nombre des fours ou » force à le réduire à un seul ;

» Soit que les fours fonctionnent ensemble à affiner le

» fer seulement à l'état d'être cinglé au marteau ou au
» cylindre ;

» Soit que les fours fonctionnent ensemble à la décar-
» buration, à l'affinage et à réchauffer le fer cinglé pour le
» dénaturer en barres ;

» Soit que ces fours fonctionnent alternativement à la
» décarburation, à l'affinage ou à réchauffer ;

» Soit enfin qu'on n'emploie qu'un seul four à affiner
» le fer et à le dénaturer en barres.

» Ainsi qu'il est projeté dans les plans ci-annexés, ces
» appareils se composent :

1°. *D'un haut fourneau.*

» 1°. D'un creuset P ;

» 2°. Des étalages situés au-dessus du creuset et de
» l'ouvrage Q ;

» 3°. Des parois V ;

2°. *D'un four.*

» 1°. D'un four B (ce four peut avoir deux portes pour
» le travail) ;

» 2°. D'un réservoir pour l'écoulement du laitier D ;

» 3°. D'un petit four qu'on pourra utiliser à décar-
» burer, à chauffer le fer, une chaudière à vapeur, un
» appareil à air chaud à griller le minerai et le bois, etc.
» (ce four peut-être supprimé à volonté) ;

» 4°. D'une cheminée pour le tirage H.

» La sole *gg* en fonte ou en sable pour les fours à affiner
» peut être concave vers le milieu ou parfaitement plane.

» Les agents de décarburation de la fonte qu'on se pro-
» pose d'employer, sont l'oxygène de l'air seul ou un mé-
» lange d'air avec la vapeur d'eau à la température que
» nécessitera le degré de décarburation des fontes. Pour
» faciliter l'évaporation des fluides à la partie supérieure
» du fourneau, on se servira d'un tuyau vertical *jj* placé

» au centre de la cuve ou paroi V. Ce tuyau sera percé de
» distance en distance et pourra être supprimé dans les
» fourneaux où les minerais subiront une préparation ou
» un grillage avant de les introduire dans le fourneau.

» Le cas arrivant où le haut fourneau ne donnerait pas
» assez de chaleur pour la décarburation et l'affinage du
» fer, on se propose d'établir une grille à brûler le charbon
» de terre ou tout autre combustible pour augmenter la
» chaleur à côté du pont ou de l'autel A.

» Si l'on veut augmenter le nombre des tuyères U, on
» pourra les placer en parallèle ou dans telle direction qui
» conviendra.

» Les diverses dimensions du haut fourneau seront sus-
» ceptibles d'éprouver, en exécution, des modifications
» sous le rapport des formes et des dimensions, selon les
» combustibles et la nature des minerais que l'on voudra
» traiter; on pourra aussi pratiquer dans le creuset P deux
» ouvertures opposées pour l'écoulement du laitier.

» Enfin on observe que, sous le rapport des formes et
» des dimensions de toutes les parties des fours, le sieur Sire
» se réserve le droit d'y faire les modifications qu'exigeront
» les fontes liquides ou solides que l'on se proposera
» d'affiner. »

Il faut ici faire remarquer que les modifications proposées par M. Sire dans la construction des hauts fourneaux sont indépendantes de celles des fours de puddlage qu'il place à la hauteur du ventre. Mais il est bien important de constater que le principe du procédé allemand, qui consiste dans la combustion des gaz par un courant d'air lancé à la fois par plusieurs ouvertures, se trouve indiqué dans l'appareil de M. Sire. Les orifices pratiqués dans le cylindre horizontal *ii*, placé transversalement à l'entrée du four à gaz, doivent fournir l'air pour brûler le gaz. L'emploi d'une cheminée assez élevée à la suite des fours devait déterminer, d'après les idées de l'inventeur, le tirage néces-

saire pour faire arriver dans le four la flamme et les gaz combustibles en quantité suffisante.

Les procédés de M. Sire ont reçu, en 1836, une certaine publicité par les nombreuses circulaires adressées par l'inventeur aux maîtres de forges de France. Une de ces circulaires, en date du 7 septembre 1836, porte ce qui suit :

« 1°. Les gaz combustibles qui seront pris à la hauteur » du dessus des étalages devront donner, par leur com- » bustion opérée dans des fours à réverbère latéraux, au » moyen de l'air atmosphérique qu'il sera toujours facile » d'y introduire, un degré de chaleur au moins égal à » celui des fours à *puddler*.

» 2°. La décarburation devra s'y effectuer aussi facile- » ment que dans les foyers d'affinerie et les fours à *pud-* » *dler*, au moyen d'un volume convenable d'air chaud et » de vapeur d'eau qui sera projeté sur la fonte.

» 3°. Les dispositions proposées ne refroidiront vrai- » semblablement pas la partie inférieure de la cuve du » haut fourneau où s'opère la fusion.

» 4°. Elles empêcheront au contraire le combustible, » qui devra être du bois desséché par un mode analogue » à celui employé dans les Ardennes, de brûler en pure » perte dans la partie supérieure de la cuve.

» 5°. Enfin, les constructions nécessaires pour l'essai » du procédé seront peu dispendieuses, soit qu'on en fasse » l'application au moyen d'un haut fourneau déjà con- » struit, soit qu'on l'applique dans une nouvelle usine. »

L'essai du procédé de M. Sire n'eut lieu nulle part, et l'inventeur, qui avait employé toutes ses ressources disponibles pour obtenir un brevet de quinze ans et pour lui donner de la publicité, se trouva dans l'impossibilité d'en tenter l'application. Lorsque les journaux industriels annoncèrent en 1841 les résultats obtenus en Allemagne et en France, M. Sire réclama la priorité de la découverte en indiquant dans ses lettres tout ce qu'il devait aux conseils

de M. Thirria, alors ingénieur des mines de la Haute-Saône, à qui il avait communiqué ses projets. M. Sire annonçait en même temps que son invention était tombée dans le domaine public, et que tous les maîtres de forges pouvaient librement l'appliquer. La discussion de cette question touche à de graves intérêts et à des titres de propriété dont il ne nous appartient pas de discuter ici la valeur.

XIII.

Recherches sur la composition des gaz qui se dégagent des foyers d'affinerie.

La transformation de la fonte en fer, dans les foyers d'affinerie alimentés avec du charbon de bois, par la méthode dite *comtoise*, s'effectue en France sur une grande échelle, et la valeur du fer en grosses barres qu'elle livre à la consommation est à peu près égale à celle des produits fournis par toutes les autres méthodes d'affinage réunies. Le prix élevé du combustible qu'on emploie dans ce procédé a fait déjà restreindre beaucoup son application, mais on n'est pas parvenu jusqu'ici à le remplacer avantageusement pour la fabrication des fers de qualité supérieure. L'autre cause qui a contribué à le maintenir, consiste dans l'emploi, aujourd'hui tout à fait pratique, des chaleurs perdues des feux d'affinerie pour les diverses élaborations du fer en barres.

Les expériences dont il sera question dans ce travail avaient un double but : j'ai cherché à éclaircir, au moyen des résultats de l'analyse des gaz produits en différents points du feu et dans les diverses périodes du travail, plusieurs points encore indécis sur la théorie de l'affinage de la fonte; en second lieu, j'ai tâché de reconnaître si la

composition des gaz combustibles dégagés du foyer d'affinerie pouvait permettre d'étendre leur emploi à de nouveaux et plus importants usages.

Ces expériences ont été entreprises aux forges d'Audincourt (Doubs), où j'ai trouvé les plus grandes facilités pour les mener à bonne fin. Leur exécution faisait partie de la mission qui m'avait été confiée, en 1838, par M. le sous-secrétaire d'État des travaux publics, et dont les premiers résultats, relatifs à l'analyse des gaz des hauts fourneaux, ont été donnés plus haut (p. 224).

Description de l'affinage.

L'affinage de la fonte par la méthode comtoise s'opère, comme on sait, dans un creuset prismatique, de forme rectangulaire, qui reçoit un courant d'air forcé par une ou deux tuyères placées sur l'une de ses faces. Les parois et le fond de ce creuset sont formés par des plaques de fonte, dont chacune porte un nom particulier.

La *varme* est la paroi qui porte les tuyères;

Le *contrevent* est la face opposée;

La *haire* est la face qui forme la partie postérieure du feu, et on donne le nom de *chio* à la paroi antérieure, qui est celle par où l'ouvrier fait écouler les scories et la seule exposée au contact de l'air.

Les dimensions du foyer comtois, la hauteur des tuyères au-dessus du fond et leur inclinaison varient légèrement suivant la nature des fontes à traiter, et aussi suivant les habitudes particulières de chaque affineur. La disposition générale des feux et les dimensions ordinaires de ceux de l'usine d'Audincourt ont été décrites récemment, avec beaucoup de soin et de détails, par M. Thirria (1), qui a comparé ce mode d'affinage avec ceux analogues employés en Champagne et en Bourgogne. Je me conten-

(1) *Annales des Mines*, 3e série, t. XVIII, p. 217.

terai d'indiquer ici quelques-unes de ces dimensions que j'ai prises moi-même sur un des feux d'Audincourt, et que je crois utiles à connaître pour l'intelligence de ce qui va suivre.

		m	
Longueur du creuset de la haire au chio ...		0,70	
Largeur au fond (de la varme au contrevent).		0,53	
Distance de la haire au centre de la 1re tuyère.		0,228	0,70
Distance entre les deux tuyères.....		0,090	
Distance de la 2e tuyère au chio		0,382	
Saillie des tuyères en avant de la varme.	La première.	0,111	
	La deuxième..... .	0,097	
Hauteur du museau des tuyères au-dessus du fond.	La première.	0,215	
	La deuxième.	0,228	

L'œil des tuyères a la forme d'un rectangle surmonté d'un demi-cercle ($0^m,028$ de base sur 0,018 de hauteur). L'orifice des buses est un cercle de $0^m,025$ de diamètre.

Inclinaison de la tuyère d'avant .	$8^o \frac{1}{2}$	(D'après M. Thirria.
Inclinaison de la tuyère d'arrière.	10°	

La pression du vent à la sortie de la buse varie entre $0^m,04$ et $0^m,05$ de mercure. Quelques-uns des feux d'Audincourt sont soufflés au vent chaud, mais on s'arrange pour que la température ne dépasse pas 60 ou 80 degrés centigrades (1). L'économie de combustible résultant de l'emploi de l'air chaud varie à peu près proportionnellement à

(1) La formule $q = 289\, d^2 \sqrt{\frac{h(1 + 0,0037\, t)}{b + h}}$ donne, en y substituant $d = 0^m,025$, $h = 0^m,040$, $b = 0^m,735$, $t = 60^o$: $q = 0^{m.c},0453$ par seconde, et pour les deux buses, $0^{m.c},0906$ à la température de 60°, et sous la pression $b + h = 0^m,775$.

Volume de l'air ramené à 0° et à la pression de $0^m,760$...	$0^{m.c},0757$
Par minute.....	$4^{m.c},5420$
Et en poids.....	$5^k,905$

En comparant le volume du vent lancé par les buses à la surface des orifices par où il s'écoule, on trouve que sa vitesse serait d'environ 100 mètres par seconde.

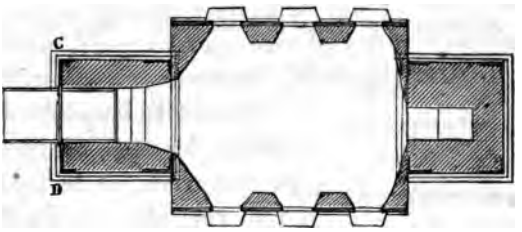
sa température, mais on a reconnu qu'au delà de 100 degrés, la qualité des fers s'altérerait très-notablement. On continue même à employer le vent froid dans tous les feux où l'on fabrique les fers de première qualité d'Audincourt.

La plaque de fond penche de l'arrière à l'avant de $0^m,020$, sur toute la longueur du feu, et de $0^m,016$ de la varme au contrevent.

Le contrevent s'incline légèrement du dedans au dehors du feu ($\frac{1}{5}$). La varme penche, au contraire, d'une petite quantité du dehors en dedans ($\frac{1}{100}$).

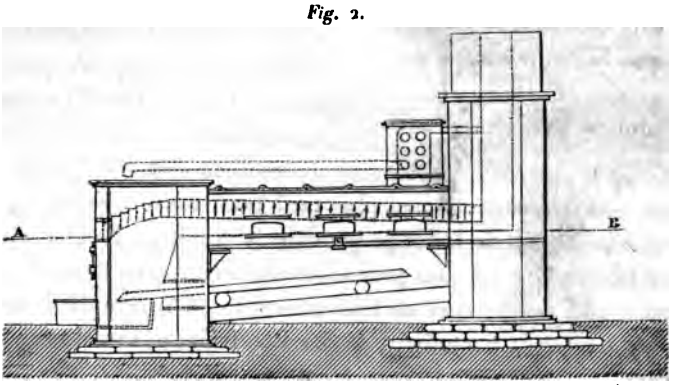
Le feu d'affinerie est recouvert d'une voûte qui permet

Fig. 1.



de conduire la flamme et les gaz combustibles sortant du feu dans des fours où leur chaleur est utilisée pour divers

Fig. 2.



usages. A Audincourt, on l'emploie principalement pour le réchauffage des barreaux destinés à la fabrication des

fers marchands de divers échantillons, pour la fabrication de la tôle, pour le recuit des fils de fer, etc.

Les *fig.* 1, 2, 3, dessinées à l'échelle de $0^m,01$ pour mètre, représentent la disposition d'un four chauffé par la chaleur perdue d'un feu de forge à Audincourt.

La *fig.* 1 donne le plan suivant la ligne AB.

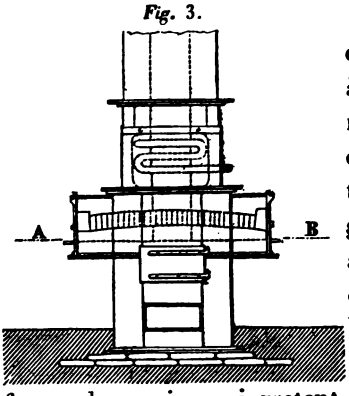
La *fig.* 2 représente une vue longitudinale.

La *fig.* 3 indique une vue transversale de face.

Ce four sert au réchauffage des barreaux pour la fabrication des petits fers marchands.

Avant de présenter le résultat des analyses faites sur les gaz pris en divers points du feu, et dans les différentes périodes du travail, j'indiquerai ici la marche et les principales circonstances de l'affinage, en renvoyant, pour plus de détails, au Mémoire de M. Thirria.

Fig. 3.



Quand la loupe est sortie du feu, les tuyères se trouvent à découvert, et le foyer ne renferme plus que du menu charbon, et en petite quantité. L'ouvrier fait avancer la gueuse qui se trouve toujours à une très-petite distance du contrevent, et disposée parallèlement à cette face. Il rejette sur la fonte tous les débris de fer et de scories qui restent disséminés dans le feu; et il en fera de même un peu plus tard pour tous les débris qui se détacheront de la loupe pendant le cinglage. L'extrémité de la gueuse est à peu près vis-à-vis des tuyères et à $0^m,28$ ou $0^m,30$ de distance de leur ouverture. On remplit le feu avec 1 rasse (1 hectolitre) de charbon frais, et l'on donne le vent.

Forgeage du fer. — Le cinglage de la loupe et sa division en deux lopins que l'on forge successivement sous le mar-

teau durent environ un quart d'heure. On rapporte au feu les deux lopins pour les souder et les étirer. Celui qui doit être forgé le premier est placé dans la ligne milieu du foyer, vis-à-vis des tuyères, à peu près à leur niveau, et de façon à ce que sa face, tournée vers les tuyères, soit éloignée de $0^m,10$ à $0^m,12$ seulement de leur extrémité. Cette position correspond à une partie du feu où la température est un maximum. Nous verrons qu'elle correspond également à une composition nettement définie du courant gazeux dont l'origine est dans les deux faisceaux d'air projetés par les tuyères.

Le deuxième lopin est placé à peu près au-dessus des tuyères. On le met à la place du premier, lorsque celui-ci, chauffé au blanc soudant, est porté sous le marteau pour être étiré. Chaque lopin exige, comme on le sait, deux *chaudes* pour être soudé et forgé en grosses barres. La seule partie du foyer où la température du fer puisse être portée au blanc soudant est celle dont j'ai défini plus haut la position.

Pendant cette première période de l'opération dont la durée est d'une heure ou de cinq quarts d'heure, le foyer est constamment rempli de charbon, et l'on ne donne pas la totalité du vent. Le seul travail du forgeron consiste à percer de temps en temps le chio pour faire écouler les scories pauvres, et à donner quelques légers coups de ringard à l'extrémité de la gueuse pour détacher la fonte qui perd toute consistance et s'égrène facilement à une température voisine de celle de sa fusion. Quand la proportion du métal au fond du creuset est suffisante pour former la pièce, on recule la gueuse un peu en dehors du feu, mais de façon à ce qu'elle reste chauffée au rouge pour l'opération suivante.

Pendant toute la durée du forgeage, la fonte repose sur les scories riches appelées *sornes*, provenant de l'opération précédente et qui s'étaient coagulées sur le fond pendant

l'interruption du travail. La présence de la sorne empêche la fonte de s'attacher à la plaque du fond. Dans une bonne conduite du travail, la fonte doit être dans un état pâteux, sous forme de grumeaux à demi coagulés et qui offrent un peu de résistance au ringard autour duquel ils s'attachent en donnant un métal très-blanc, rayonné. L'affinage de la fonte dans cet état est beaucoup plus prompt que quand elle est tout à fait liquide. Si la fonte reste longtemps liquide sur le fond, ce qui arrive quand elle a fondu trop vite au contrevent, ou quand elle est très-noire, les ouvriers disent que la fonte est *changée*, et l'affinage se trouve très-notablement retardé.

Désornage. — La deuxième période de l'affinage, ou le travail proprement dit, commence par le *désornage*, c'est-à-dire par l'enlèvement de la croûte de scories riches qui recouvre le fond du creuset. Cette opération s'exécute en soulevant à la fois le gâteau de fonte et la sorne, enlevant celle-ci, et exposant le métal pâteux à l'action directe du vent de la tuyère. On doit le considérer comme une sorte d'éponge métallique imprégnée de scories. Ce mélange s'affaisse de nouveau sous l'action du vent, et descend au-dessous du niveau des tuyères. A ce moment, et pour accélérer l'affinage, l'ouvrier ajoute à son feu environ 15 kilogrammes de rognures de tôle, de débris de ferraille, qui se ramollissent et s'affaissent sous l'action du vent. Cette addition du fer n'a pas lieu, comme on le sait, dans toutes les usines. Elle rend le fer meilleur, l'affinage plus rapide, mais pas être indispensable à la réussite de l'opération.

Travail de la pièce. — A ce moment, la masse ferreuse repose sur le fond, à demi plongée dans un bain de scories riches. L'ouvrier en soulève légèrement les différentes parties, de façon à faire circuler l'air tout à l'entour de la pièce. La couleur et l'aspect du laitier que le forgeron retire au bout de son ringard lui indiquent que le fer est affiné. Il plonge alors son ringard dans la masse de fer et il l'en retire

entouré d'un dé de fer appelé *sifflet*, qu'il détache pour le rejeter sur la masse. Après avoir tiré deux ou trois *sifflets* et s'être ainsi assuré que l'affinage est complet, l'ouvrier *avale*, c'est-à-dire qu'il rejette avec la pelle, sur le museau des tuyères, toutes les parties de fer qui se trouvent disséminées dans le feu au milieu du charbon, et qui viennent se souder à la masse de la loupe. Celle-ci s'élève alors du fond du creuset jusqu'au niveau des tuyères. Quand on la retire du feu, on peut y remarquer deux trous creusés assez profondément dans la masse ferreuse par les deux faisceaux d'air. A la fin de l'affinage, tout le vent est lancé dans une petite cavité qu'il a creusée au milieu du fer. La température est extrêmement élevée dans cet espace, et tous les débris ferreux mêlés au menu charbon qu'on y rejette, fondent et se réunissent au reste de la masse. On refroidit alors le museau des tuyères avec des battitures mouillées (1), on arrête le vent et l'on retire la loupe du feu.

Dans cette deuxième période de l'affinage, qui dure 25 à 30 minutes depuis le commencement du désornage, on ajoute au feu très-peu de charbon, tout au plus $\frac{1}{12}$ de la quantité totale consommée dans l'opération. Dans cet intervalle de temps, on brûle le menu charbon qui remplit le feu au moment du désornage. En se transformant en fer, la fonte augmente beaucoup de volume, et l'éponge ferreuse qui forme la loupe remplit toute la capacité du creuset.

L'affinage dure ordinairement 1 heure $\frac{3}{4}$, et fournit 80 kilogrammes de fer forgé en grosses barres. Le tableau suivant représente le roulement des six feux des forges d'Audincourt pendant les deux mois de septembre et d'octobre 1842.

---

(1) Si l'on ne prenait pas cette précaution, les tuyères, qui sont en cuivre, fondraient aussitôt qu'on arrêterait le vent.

Roulement des six feux des forges d'Audincourt.

DATES.	CONSOMMATIONS.				FER produit.	MISE AU MILLIER.	
	Charbon.	Fonte.	Rognures et ferrailles.	Total.		Fonte.	Charbon.
	hect.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	hect.
Septembre 1842.	7.777	156.651	34.390	191,041	139.009	1.374	55,94
Octobre 1842. .	7.192	146.949	30.080	177.029	128.510	1.377	55,96

On consomme donc à peu près 56 hectolitres de charbon (129 kil.) pour 100 de fer en barres. Cette consommation en charbon est très-faible, mais il est à remarquer que la consommation en fonte et ferraille est un peu plus considérable que celle ordinaire (1,330 à 1,350). La ferraille et les rognures éprouvent à peu près le même déchet que la fonte pour se transformer en fer forgé dans les feux d'affinerie.

Examen des gaz qui se produisent dans le foyer.

Après cette description de l'affinage, j'arrive à l'examen des gaz qui se produisent dans le foyer.

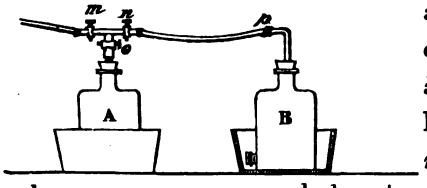
La détermination de la composition des gaz qui circulent dans les différentes régions du feu, offre de plus grandes difficultés et présente bien plus d'incertitude que celle des gaz du haut fourneau. La grandeur des dimensions de celui-ci permet de reconnaître et de classer nettement les réactions qui s'opèrent dans chacune de ses parties. Les changements de composition du courant gazeux qui s'élève dans le fourneau par tranches parallèles se déduisent facilement de l'analyse des gaz pris à des hauteurs déterminées au-dessus de la tuyère; mais on conçoit facilement qu'il ne peut pas en être de même dans un foyer d'affinerie. Parmi les molécules d'air projetées avec une vitesse de 100 mètres par seconde, les unes suivent leur direction initiale jusqu'au contrevent, tandis que d'autres vont s'échapper en

divergeant de tous les points du feu. Toutes n'éprouvent donc pas les mêmes modifications chimiques.

La composition *moyenne* du gaz qui sort du foyer d'affinerie paraît aussi, à priori, devoir être très-variable aux différentes époques de l'opération. Ainsi, au commencement de l'affinage, les tuyères sont recouvertes de $0^m,30$ à $0^m,40$ d'épaisseur de charbon frais. Pendant le travail de la pièce, tout le charbon est en menu, et son épaisseur au-dessus des tuyères ne dépasse pas $0^m,10$. On verra effectivement que ces deux circonstances font varier considérablement la composition du gaz pendant la durée de l'affinage.

Pour avoir du gaz provenant d'une partie déterminée du feu d'affinerie, j'employais un canon de fusil muni intérieurement d'un tube de porcelaine, et préparé comme je l'ai indiqué dans mon travail sur les gaz des hauts fourneaux (p. 259). On introduisait cet appareil dans le foyer, de façon à ce que son extrémité se trouvât dans une position déterminée. Dans l'autre bout du canon de fusil on faisait plonger le tube qui communiquait avec le flacon aspirateur destiné à recueillir le gaz. Les procédés que j'ai suivis pour le transvasement et l'analyse des gaz ne diffèrent pas notablement de ceux que j'ai décrits avec détail dans mon précédent Mémoire (p. 263).

J'ai seulement modifié, de la manière suivante, la méthode que j'avais suivie pour recueillir le gaz dans le flacon aspirateur. Le flacon A, dans lequel arrive le gaz à analyser, porte un robinet à trois branches, *m*, *n*, *o*, qui s'ajuste au tube en verre traversant le bouchon par un tube en caoutchouc, et on maintient celui-ci dans une position verticale en l'entourant d'une feuille métallique. L'extrémité *n* communique par un tuyau de caoutchouc *np* avec un flacon



aspirateur B semblable au premier; *m* s'ajuste à un tube en plomb qui va plonger dans le courant de gaz sortant du canon de fusil. Le flacon A est exactement rempli d'eau et d'huile; B est rempli d'eau. On place chacun d'eux dans un seau qui contient assez d'eau pour baigner la tubulure inférieure que l'on débouche. Quand le tube en fer et le tube de plomb sont mis en place, on ouvre les robinets *m*, *n*. Le flacon B se remplit, et l'air des tubes se trouve remplacé par des gaz du foyer. On ferme alors *n*, et on ouvre le robinet *o*, au moyen duquel on remplit l'aspirateur A.

L'extrémité du canon de fusil restait ouverte toutes les fois que le gaz en sortait librement. Dans le cas contraire, on y adaptait un bouchon fermant bien et traversé par le tube en plomb. Le flacon B sert alors à enlever à la fois l'air contenu dans le canon de fusil et celui qui remplit le tube en plomb.

Dans toutes mes analyses, j'ai dosé l'azote par différence. Son dosage direct a été effectué dans chaque expérience en suivant le procédé décrit (p. 269), et le nombre obtenu a servi de vérification à l'analyse. J'indique ce résultat à la suite des données de chaque expérience.

1° *Gaz aspirés pendant le forgeage du fer.*

(*Première période de l'affinage.*)

Les trois expériences qui suivent ont eu pour but de reconnaître la composition du gaz pris dans la partie du foyer où l'on place le fer à souder; elles ont donné les résultats suivants :

	(1)	(2)	(3)
Gaz pour l'analyse.....	$1^{lit},565$	$1^{lit},505$	$1^{lit},505$
Baromètre.....	$0^{m},736$	$0^{m},732$	$0^{m},736$
Thermomètre.....	$15°,5$	$17°$	$20°,4$
Gaz ramené à 0° et à $0^{m},760$. ...	$1^{lit},435$	$1^{lit},360$	$1^{lit},358$

		gr	gr	gr
Acide carbonique		0,447	0,364	0,207
Produits de la combustion.	Eau	0,008	0,010	0,004
	Acide carbonique	0,229	0,335	0,546
	Oxygène absorbé	»	0,126	0,194
Azote dosé directement pour 100 volumes de gaz sec		74,9	73,9	72,9
		75,6	»	71,5

On déduit de ces nombres :

	(1)	(2)	(3)
Acide carbonique	15,73	13,51	7,70
Oxyde de carbone	8,06	12,44	20,31
Hydrogène	0,70	0,90	0,37
Azote	75,51	73,15	71,62
	100,00	100,00	100,00

(1). Le canon de fusil est enfoncé dans le feu de façon à ce que son extrémité se trouve à peu près vis-à-vis des tuyères et en contact avec la face du lopin tournée vers le vent. — Le gaz est pris quelques instants après l'introduction du lopin dans le feu. Le tube de fer est chauffé au blanc et brûle à l'air quand on le retire; l'aspiration n'a duré que deux minutes.

(2). Gaz pris dans la même position que le précédent. Le canon de fusil longe la face du lopin exposée au vent; mais il est enfoncé à une profondeur un peu moindre que dans l'expérience (1). Le tube est chauffé au blanc quand on le retire.

(3). Gaz pris entre les deux lopins, à peu près à la hauteur de leur face supérieure et vis-à-vis des tuyères. Le tube de fer est chauffé au blanc, mais il ne donne pas d'étincelles à l'air comme dans les deux expériences précédentes; il a séjourné dans le feu pendant trois minutes.

L'aspiration des gaz, dans cette partie du foyer où la température est évidemment la plus élevée, ne m'a paru possible que pendant le commencement du chauffage des lopins. Lorsqu'il y a déjà des scories fondues dans le feu, elles sont projetées par le vent et viennent obstruer rapide-

ment le tube aspirateur. Cette circonstance m'a fait manquer plusieurs expériences.

Dans la description que j'ai donnée plus haut de l'affinage, j'ai indiqué quelle était, dans le foyer, la position constante du fer à chauffer par rapport aux tuyères. On voit, d'après les expériences qui précèdent, que cette position correspond à une transformation déjà complète de l'oxygène de l'air en acide carbonique. Lorsqu'on s'éloigne un peu de la face inférieure du prisme quadrangulaire qui forme le lopin, tout en prenant le gaz le long de la face verticale qui fait face aux tuyères, on voit l'acide carbonique se changer progressivement en oxyde de carbone. Le maximum d'acide carbonique correspond à la position de la face inférieure du lopin, position qui paraît être aussi le lieu du maximum de température, car l'ouvrier retourne plusieurs fois sa pièce pour que chacune de ses faces y soit successivement placée.

L'emploi de deux tuyères légèrement divergentes a pour but d'augmenter la largeur de la lame d'air et l'étendue du lieu du maximum de température. Cette innovation est maintenant généralement adoptée dans les forges de Franche-Comté.

Dans les trois expériences qui suivent, on a analysé des gaz aspirés dans le voisinage de la fonte placée au contrevent.

Voici les données de ces expériences :

		(4)	(5)	(6)
Gaz pour l'analyse		$1^{lit},500$	$1^{lit},485$	$1^{lit},565$
Baromètre		$0^{m},731$	$0^{m},736$	$0^{m},734$
Thermomètre		19°	22°,5	17°,6
Gaz ramené à 0° et à $0^{m},760$		$1^{lit},349$	$1^{lit},329$	$1^{lit},420$
Acide carbonique		$0^{gr},044$	$0^{gr},044$	$0^{gr},173$
Produits de la combustion.	Eau	0,021	0,026	0,015
	Acide carbonique.	0,780	0,733	0,681
	Oxygène absorbé.	0,294	»	»
Dosage direct d'azote pour 100 volumes gaz sec		66,6	68,4	70,1
		»	67,1	»

Elles donnent les nombres suivants :

	(4)	(5)	(6)
Acide carbonique.....	1,64	1,67	6,15
Oxyde de carbone.....	29,20	27,85	24,11
Hydrogène.....	1,92	2,44	1,30
Azote.....	67,24	68,04	68,44
	100,00	100,00	100,00

(4). La prise de gaz a lieu au moment où l'on rapporte au feu le premier lopin provenant de l'étirage de la loupe, douze minutes après que l'on a rendu le vent au foyer. Le canon de fusil touche la gueuse le long de la face tournée vers le vent.

(5). Pris comme le précédent le long de la gueuse, à sa partie inférieure, du côté des tuyères ; on vient de rapporter au feu le second lopin, 16 minutes après la reprise de l'opération. — Le canon retiré du feu est chauffé au rouge-cerise.

(6). La prise de gaz a lieu 18 minutes après qu'on a rendu le vent. Les deux lopins sont au feu et non étirés. — Le tube en fer est enfoncé le long de la face de la gueuse exposée au vent, et son extrémité se trouve à peu près vis-à-vis des tuyères. Il est chauffé au blanc naissant quand on le retire.

En cherchant à répéter ces expériences, à une époque un peu plus avancée de l'affinage, lorsque la fonte est déjà en partie fondue dans le creuset, je n'ai pu obtenir de résultat ; le tube en fer s'obstrue très-rapidement par les scories que projette le vent.

Une expérience faite pendant le forgeage de la loupe, en prenant le gaz dans le foyer à la hauteur et vis-à-vis des tuyères et à $0^m,10$ environ de distance de la gueuse, a fourni les données suivantes :

	(7)
Gaz pour l'analyse.....	$1^{lit},490$
Baromètre.....	$0^m,735$
Thermomètre.....	$18^o,2$
Gaz ramené à 0° et à $0^m,760$.....	$1^{lit},351$

		gr	
Acide carbonique		0,229	
Produits de la combustion.	Eau	0,029	
	Acide carbonique	0,447	
	Oxygène absorbé	»	
Déterminations directes d'azote		72,6	71,2

Elle conduit aux nombres qui suivent :

	(7)
Acide carbonique	8,56
Oxyde de carbone	17,83
Hydrogène	2,66
Azote	70,95
	100,00

Dans les expériences qui suivent, on a analysé des gaz aspirés à la surface du feu, immédiatement au-dessus des charbons. Le canon de fusil était introduit dans le foyer par un trou pratiqué dans la paroi opposée aux tuyères.

Les analyses ont donné les résultats suivants :

		(8)	(9)	(10)
Gaz pour l'analyse		1^{lit},560	1^{lit},555	1^{lit},540
Baromètre		0^{m},731	0^{m},722	0^{m},728
Thermomètre		17°,2	16°	14°
Gaz ramené à 0° et à 0^{m},760		1^{lit},411	1^{lit},395	1^{lit},403
		gr	gr	gr
Acide carbonique		0,261	0,162	0,100
Produits de la combustion.	Eau	0,466	0,629	0,688
	Acide carbonique	0,063	0,084	0,068
	Oxygène absorbé	0,251	0,299	0,307
Dosages directs d'azote pour 100 volumes de gaz sec		69,5	64,9	67,0
		68,2	»	»

Ce qui conduit aux compositions suivantes :

	(8)	(9)	(10)
Acide carbonique	9,34	5,86	3,60
Oxyde de carbone	16,68	22,76	24,76
Hydrogène	5,53	7,46	6,01
Azote	68,45	63,92	65,63
	100,00	100,00	100,00

		(11)	(12)
Gaz pour l'analyse		$1^{lit},585$	$1^{lit},580$
Baromètre		$0^{m},730$	$0^{m},732$
Thermomètre		15°,5	14°,5
Gaz à 0° et à $0^{m},760$		$1^{lit},440$	$1^{lit},445$
Acide carbonique		gr 0,289	gr 0,368
Produits de la combustion.	Eau	0,458	0,340
	Acide carbonique	0,027	0,029
	Oxygène absorbé	0,185	0,158
Dosages directs d'azote		70,7	73,8

On tire de là :

	(11)	(12)
Acide carbonique	10,14	12,86
Oxyde de carbone	16,06	11,88
Hydrogène	2,34	2,51
Azote	71,46	72,75
	100,00	100,00

(8), (9), (10). Gaz pris à la surface du foyer pendant le réchauffage des deux lopins. Les tuyères sont recouvertes de $0^{m},30$ d'épaisseur de charbon. Le gaz (8) est pris au milieu du feu, 15 minutes après qu'on a rendu le vent. Ceux (9) et (10) sont aspirés du côté du contrevent, 20 et 25 minutes après la mise en feu.

(11), (12). Gaz pris à la surface et au milieu du foyer pendant le soudage du dernier bout de barre. (11). Aspiré 1 heure après le commencement de l'affinage. (12). Pris $1^{h}10^{m}$ après la mise en feu. Une grande partie du charbon est en menu, et son épaisseur au-dessus des tuyères n'est guère que de $0^{m},15$. Le vent sort en gerbe au milieu du feu, en projetant tout à l'entour de petits fragments de charbon.

Gaz aspirés pendant le travail de la pièce.

(*Deuxième période de l'affinage.*)

Cette deuxième partie de l'affinage, qui commence par l'enlèvement de la sorne, dure ordinairement 25 à 30 minutes. Le foyer ne renferme presque que du menu charbon

provenant de celui ajouté pendant le forgeage, et on n'introduit qu'une faible quantité de charbon frais jusqu'à la fin de l'affinage. Le vent, lancé avec toute sa vitesse, s'épanouit au milieu du feu en une gerbe brillante. Les expériences qui suivent ont été faites en introduisant l'extrémité du canon de fusil au milieu de ce faisceau d'air. Le gaz aspiré renfermait toujours une proportion notable d'oxygène libre; pour pouvoir la déterminer en même temps que celle des autres gaz, j'employais un tube à combustion contenant sur une moitié de sa longueur du cuivre métallique, et sur l'autre moitié de l'oxyde noir de cuivre. Si le gaz renferme un excès d'oxygène, l'augmentation du poids du tube à combustion permettra de le doser. Le gaz aspiré contient à la fois, dans toutes les analyses qui suivent, de l'oxygène libre mêlé à des gaz combustibles. Leur existence simultanée paraît due à des variations de composition du gaz pendant la durée de l'aspiration. En comparant les quantités d'eau et d'acide carbonique produites par la combustion du gaz à la variation de poids de tube à combustion, et en partant de ce fait, vérifié par toutes les expériences qui précèdent, que les gaz combustibles sont formés d'oxyde de carbone et d'hydrogène, il est facile de calculer la proportion d'oxygène libre.

Voici les résultats obtenus dans les quatre expériences :

		(13)	(14)
Gaz pour l'analyse		$1^{lit},535$	$1^{lit},540$
Baromètre		$0^{m},730$	$0^{m},729$
Thermomètre		$17^{\circ},8$	17°
Gaz ramené à 0° et à $0^{m},760$		$1^{lit},383$	$1^{lit},390$
Acide carbonique		$0^{gr},328$	$0^{gr},342$
Produits de la combustion	Eau	0,035	0,009
	Acide carbonique	0,244	0,073
	Oxygène absorbé (1)	+0,098	— 0,048
Azote dosé directement		75,4	81,0

(1) Le signe + indique l'oxygène cédé par l'oxyde de cuivre; le signe — l'oxygène abandonné par le gaz dans le tube à combustion.

		(15)	(16)
Gaz pour l'analyse		$1^{lit},515$	$1^{lit},515$
Baromètre		$0^{m},728$	$0^{m},727$
Thermomètre		20°,5	15°,5
Gaz ramené à 0° et à $0^{m},760$		$1^{lit},350$	$1^{lit},371$
Acide carbonique		gr 0,274	gr 0,254
Produits de la combustion	Eau	0,000	0,003
	Acide carbonique	0,037	0,011
	Oxygène absorbé	—0,103	—0,129
Azote dosé directement		81,2	84,2-83,5

Ces données conduisent aux compositions qui suivent :

	(13)	(14)	(15)	(16)
Acide carbonique	11,97	12,42	10,25	9,36
Oxyde de carbone	8,91	2,65	1,38	0,40
Hydrogène	3,15	0,78	0,00	0,22
Oxygène	1,12	4,10	6,52	6,95
Azote	75,05	80,05	81,85	83,07
	100,00	100,00	100,00	100,00

(13). Gaz aspiré au moment où l'ouvrier va soulever le gâteau de fonte pour *désorner*. Le bout du canon de fusil se trouve au milieu du foyer, à $0^{m},05$ au-dessus du feu et à peu près dans le centre de la gerbe formée par le vent. — La composition du gaz se rapproche de celle du gaz analysé dans l'expérience (12), la quantité d'oxygène libre étant très-peu considérable.

(14). Gaz aspiré immédiatement après le désornage. L'ouvrier vient d'ajouter au feu 15 kilogrammes environ de rognures de tôle. Le bout du canon est placé, comme dans l'expérience précédente, au centre du foyer et à $0^{m},05$ au-dessus des charbons.

(15). Gaz pris pendant le travail de la pièce, au centre du foyer et vis-à-vis des tuyères.

(16). Le gaz est aspiré pendant l'*avalage*, dans la même partie du foyer que les deux précédents.

En rapprochant les uns des autres les résultats de toutes

les expériences qui précèdent, et en les comparant à ceux déjà connus touchant la composition des produits fixes de l'affinage (fer et scories), nous pourrons en déduire quelques conclusions relatives à la théorie de l'opération.

1°. L'oxygène de l'air projeté par les tuyères pendant toute la période du forgeage, se change rapidement en acide carbonique, puis en oxyde de carbone, en suivant sa direction initiale jusqu'au contrevent. Le lieu du maximum de température correspond à la position unique dans laquelle on place le fer à forger, et cette position correspond également à un maximum d'acide carbonique dans l'atmosphère gazeuse; ce fait résulte des expériences (1), (2), (3).

2°. La position de la fonte, près du contrevent, dans le foyer comtois, correspond à une transformation presque complète de l'acide carbonique en oxyde de carbone, comme le prouvent les expériences (4), (5), (6). Sa fusion ou sa désagrégation s'opèrent donc dans une atmosphère dont l'action oxydante doit être très-peu énergique.

3°. Pendant toute la période du forgeage, l'ouvrier a soin de maintenir une hauteur assez considérable de charbon au-dessus des tuyères, sans doute afin de conserver à l'air sa direction initiale jusqu'au contrevent. Une partie des gaz s'échappe cependant par toute la surface du foyer. Si l'on compare leur composition avec celle des gaz pris dans l'intérieur du feu, on trouve, d'après les expériences (8), (9), (10), qu'ils en diffèrent surtout par une proportion beaucoup plus considérable d'hydrogène. Cette circonstance s'explique facilement : les charbons qui sont au centre du foyer ont été déjà fortement échauffés, et ils ont perdu la majeure partie de leurs matières volatiles. Il n'en est pas de même de ceux voisins de la surface du feu, dont la distillation commence seulement à s'effectuer.

On peut remarquer également que les gaz pris à la surface du foyer renferment encore une proportion très-notable d'acide carbonique, surtout ceux aspirés sur les

tuyères. J'explique ce résultat en faisant remarquer que l'acide carbonique, premier produit de la combustion, ne se transformera pas complétement en oxyde de carbone, s'il ne rencontre pas du charbon déjà porté à une haute température. Or, le charbon qui recouvre le foyer étant froid, ne peut pas opérer cette transformation aussi bien que celui qui se trouve dans l'intérieur du feu, et que le courant de gaz traverse en se dirigeant de la tuyère vers le contrevent. Cette transformation de l'acide carbonique en oxyde de carbone absorbe en effet, comme je l'ai précédemment établi, une grande quantité de chaleur, et des expériences faites à Audincourt m'ont prouvé que l'acide carbonique peut traverser une épaisseur considérable de charbon chauffé au rouge-cerise sans être complétement changé en oxyde de carbone.

L'eau que l'ouvrier jette de temps en temps à la surface du feu, paraît avoir également pour but d'éteindre les charbons qui le recouvrent, et d'éviter ainsi partiellement la perte de combustible qui résulterait de la transformation de l'acide carbonique en oxyde de carbone.

4°. Pendant la deuxième période de l'affinage, celle qui correspond au travail de la pièce, la majeure partie des gaz s'échappe du feu d'affinerie dans un faisceau central qui contient une proportion très-notable d'oxygène libre, comme le prouvent les expériences (14), (15), (16) Les expériences dont il sera question plus loin (19) et (20), et qui se rapportent à la composition des gaz pris dans les fours à chaleur perdue pendant la même période, prouvent qu'il y a au contraire excès d'oxyde de carbone dans les gaz qui se dégagent des autres points du feu.

La nature de l'atmosphère gazeuse qui entoure la fonte pendant sa fusion, ne permet pas d'admettre, avec M. Karsten, que la fonte se décarbure au moyen de l'oxygène de l'air, en tombant goutte à goutte au milieu des charbons jusqu'au fond du creuset. M. Chevreul avait

fait déjà remarquer (*Journal des Savants*, 1833) que cette action décarburante de l'air était bien peu probable, puisque le fer se trouve dans la fonte en grand excès par rapport au carbone, et qu'ainsi l'oxygène de l'air, s'il agissait sur la fonte, devrait brûler simultanément le fer et le carbone à la surface des gouttelettes du métal. On doit attribuer la décarburation, pendant la première période de l'affinage, à l'oxygène des battitures et des scories riches qu'on rejette sur la gueuse avant de rendre le vent et après le forgeage de la loupe; elles peuvent d'abord réagir sur la fonte par cémentation; elles fondent et, projetées par le vent, elles viennent constamment mouiller la surface du métal. On peut donc concevoir comment la décarburation s'opère déjà en même temps que la fusion, et pourquoi il importe que celle-ci ait lieu lentement, afin que la surface exposée à ces projections de scories ne se renouvelle que peu à peu. La fonte séparée de la gueuse, repose, comme je l'ai déjà fait remarquer, sur un fond de sorne solide, et se trouve, dans une bonne conduite du travail, sous forme d'une masse demi-liquide, un peu consistante, en grumeaux dont chacun est entouré d'une enveloppe de scories, ce qui n'arriverait pas si le métal était tout à fait liquide.

La présence des scories au fond du creuset est aussi fort utile pour le soudage du fer. Le forgeron a grand soin de tremper de temps en temps son lopin dans le bain de scories, afin de le préserver, au moyen d'une enveloppe liquide, de l'action oxydante du vent.

En décarburant la fonte, en oxydant le silicium, le manganèse, le chrome (1) qu'elle contient, en dissolvant les grains sableux qui proviennent du moulage de la gueuse, et

(1) Les scories des forges d'Audincourt renferment une proportion très-notable d'oxyde de chrome, environ 1 pour 100. On n'en trouve pas de trace dans les laitiers de haut fourneau. Tout le chrome des minerais se concentre dans la fonte et passe ensuite dans les scories d'affinerie. On y a recherché également le vanadium, mais sans en trouver une trace.

le laitier du haut fourneau qui s'y trouve mécaniquement mélangé, les scories deviennent de plus en plus siliceuses; leur fluidité augmente, mais leur action sur la fonte décroît, et l'ouvrier les fait alors écouler par le chio.

Dans cette première période, l'affinage s'opérant par l'oxygène du protoxyde de fer, il n'y a pas oxydation du fer contenu dans la fonte, et, par conséquent, pas d'autre déchet que celui dû au départ du carbone, du silicium, etc., déchet qui serait plus que compensé par le fer réduit.

La séparation du carbone au moyen de l'oxygène du protoxyde de fer, doit produire une absorption considérable de chaleur latente. En effet, les expériences de Dulong donnent le nombre 6,216 pour la quantité de chaleur que dégage un litre d'oxygène dans la combustion du fer. La même quantité d'oxygène, en passant à l'état d'oxyde de carbone par sa réaction sur le carbone solide, ne produit que 1,598 unités de chaleur. L'expulsion du carbone de la fonte, au moyen du protoxyde de fer des scories, doit donc donner une absorption de chaleur latente égale au moins à 4,618 unités (1). Cette quantité de chaleur rendue latente correspond à un litre de vapeur de carbone ou $1^{gr},077$, et il est facile d'en déduire l'abaissement de température qu'éprouverait la masse ferreuse par le fait de la décarburation. En effet, 1 gramme d'une fonte contenant 4 pour 100 de carbone, absorberait en unités 171,52 de chaleur latente; et si nous admettions 0,1138 pour la chaleur spécifique du fer (M. Regnault), nous trouverions 1,500 degrés pour l'abaissement de température produit (2). La réaction des scories riches sur le carbone de la fonte exigera donc, pour se continuer, l'intervention constante d'une source de chaleur extérieure.

(1) Dans les expériences de Dulong, le fer, en brûlant dans l'oxygène, passait à l'état d'oxyde magnétique, tandis qu'ici c'est le protoxyde de fer qui se réduit. Il est bien probable que la quantité de chaleur dégagée par le premier atome d'oxygène est la plus forte.

(2) L'abaissement réel de température doit être moindre, puisque la chaleur spécifique du métal augmente avec la température.

Le silicium se trouve comme le carbone oxydé par l'oxygène des scories, mais nous manquons de données pour apprécier l'effet calorifique dû à cette réaction : l'expérience suivante rend assez probable qu'il y a plutôt dégagement qu'absorption de chaleur. En effet, le silicium chauffé au rouge avec du carbonate de potasse l'oxyde en mettant du carbone en liberté, et en dégageant une grande quantité de chaleur; la production de chaleur due à l'oxydation du silicium est donc de beaucoup supérieure à celle rendue latente par la réduction du charbon : ici il est vrai que le phénomène se complique par suite de la réaction de la silice sur l'alcali, mais c'est une analogie de plus avec ce qui se passe dans le foyer d'affinerie où la silice une fois formée se combine avec le protoxyde de fer.

Dans la deuxième période de l'affinage, la masse ferreuse, sorte d'éponge métallique imbibée de scories crues, est soumise directement à l'action du vent. On a vu plus haut, par les expériences (14), (15), (16), que le faisceau d'air qui s'échappe du centre du foyer contenait encore une forte proportion d'oxygène; mais il est facile de se convaincre que, dans chacune des analyses, la quantité d'oxygène libre ou combiné dans le gaz ne représente pas la totalité de celui qui correspond à l'azote atmosphérique (1). Ces résultats prouvent l'absorption par le fer d'une proportion très-notable de l'oxygène contenu dans l'air injecté par la tuyère, et c'est là sans doute l'origine du déchet considérable que subit la fonte dans l'affinage comtois. — En même temps, l'oxydation du fer détermine une grande élévation de température qui produit de nouveau la fusion du métal. Une partie du carbone restant encore dans la fonte se brûle di-

(1) Les quantités d'oxygène, rapportées à 100 volumes d'azote, sont respectivement :

(13)	(14)	(15)	(16)
23,3	22,3	21,3	19,9

La proportion normale est, comme on sait, 26,26.

rectement par l'oxygène de l'air avec une quantité de fer correspondante. Les scories crues qui imprégnaient le fer sont changées en scories très-basiques, et cette circonstance, jointe à l'élévation de température produite par l'oxydation du fer, facilite leur action décarburante.

Le travail de la pièce consiste à soulever légèrement la masse avec un ringard appuyé sur le fond et sur les parois du creuset, de façon à faire circuler une partie du vent tout à l'entour, et à en maintenir ainsi toutes les parties à une température élevée.

Les rognures de tôle qu'on ajoute souvent au feu vers le commencement du travail, diminuent la consommation du charbon et facilitent la conversion de la masse ferreuse en fer ductile. Les ouvriers disent qu'elles apportent de la chaleur au feu. Quand le foyer est recouvert de rognures, on remarque effectivement que sa surface devient blanche jusqu'au contrevent, tandis qu'avec le charbon le lieu du maximum paraît beaucoup moins étendu et se trouve au centre du faisceau de gaz qui s'échappe au milieu du feu.— Cette différence, dans la distribution de la chaleur, s'explique aisément en considérant que la combustion du fer ne donne dans ce cas qu'un seul oxyde, et que le courant de gaz doit conserver toute la chaleur sensible qui lui a été communiquée dans cette réaction (1).

---

(1) On peut calculer la température produite de la manière suivante :

1 litre d'oxygène, pesant $1^{gr},436$, se trouve associé dans l'air à $3^{lit},80$ d'azote, pesant $4^{gr},804$.

1 litre d'oxygène se combine avec $4^{gr},870$ de fer, et donne $6^{gr},306$ de protoxyde qui se dissolvent dans la scorie, et 6,216 unités de chaleur.

En admettant, pour la chaleur spécifique du produit de l'oxydation, le nombre 0,157 (nombre trouvé par M. Regnault pour le protoxyde de manganèse, et qui doit être à peu près le même pour le protoxyde de fer en raison de l'égalité des formules et des poids atomiques), on trouvera pour la température de l'oxyde et pour celle de l'azote :

$$\frac{6,216}{4,804 \times 0,2754 + 6,306 \times 0,157} = 2,690^{\circ}.$$

Ce nombre n'est évidemment qu'une approximation, puisqu'on a supposé

L'importance que les affineurs attachent aux dimensions intérieures du feu, et particulièrement à l'inclinaison des tuyères et à leur hauteur au-dessus du fond, prouve que ces circonstances ont une assez grande influence sur la marche de l'opération : on les fait varier suivant la nature des fontes d'affinage. Les dimensions que j'ai indiquées plus haut se rapportent à l'affinage des fontes grises ordinaires. Quand on a des fontes noires, on rehausse la plaque de fond de 7 millimètres et l'on diminue de moitié l'inclinaison des tuyères. Pour des fontes blanches, le feu serait monté d'une manière inverse, c'est-à-dire qu'on augmenterait un peu la profondeur du feu et l'inclinaison des tuyères.

Il me paraît difficile de donner en ce moment une explication satisfaisante de cette pratique. Les dimensions du foyer et l'inclinaison des tuyères doivent être calculées de

---

constantes les chaleurs spécifiques de l'azote et du produit de l'oxydation.

Quand l'oxydation du fer s'opère par la transformation de l'acide carbonique en oxyde de carbone, la quantité de chaleur dégagée par l'oxydation (6,216) est à très-peu près égale à celle que produirait la combustion de 2 litres d'oxyde de carbone formé (6,260) et qui a dû être rendue latente par le fait de la décomposition de l'acide carbonique. Le courant de gaz conservera donc la température due à la formation de ce dernier gaz.

Ce résultat, comparé à celui qu'on obtient par le changement de l'acide carbonique en oxyde de carbone par le charbon en excès, permet d'expliquer d'une manière simple certaines circonstances fort singulières que présente quelquefois le roulement des hauts fourneaux, surtout quand on emploie un vent trop fort. On voit *la chaleur se porter au gueulard*, et les parois supérieures de la cuve rougissent, tandis qu'à l'ordinaire, la température ne dépasse pas 150 ou 200°. En même temps les fontes deviennent blanches, les minerais ne rendent que fort peu de métal, les laitiers sont très-ferreux et le creuset très-refroidi. L'oxyde de fer que contiennent les laitiers s'est formé évidemment ici aux dépens du fer réduit dans les parties supérieures du fourneau, puis oxydé dans son passage devant les tuyères par l'oxygène ou par l'acide carbonique.

Si l'on considère que le changement de l'acide carbonique en oxyde de carbone par le charbon abaisse la température du courant de 2,300 à 900°, tandis que cette même transformation, opérée par le fer, ne produit pas d'absorption de chaleur, il est évident que la quantité de calorique sensible que contient la colonne gazeuse ascendante, sera d'autant plus grande que

manière à pouvoir restituer au bain liquide la chaleur absorbée par la décarburation de la fonte et par la réaction des morceaux de charbon sur les scories dans lesquelles ils plongent. M. Karsten (1) pense que plus le creuset est profond et plus les tuyères sont plongeantes, jusqu'à une certaine limite, plus la température du bain liquide est élevée. Il convient donc de disposer le creuset de cette manière quand le métal s'affine vite et a trop de tendance à *louper*, comme cela arrive avec les fontes blanches. Pour les fontes grises et noires, M. Karsten pense qu'il faut entretenir le bain de métal à une température comparativement plus basse que dans le cas précédent.

On peut objecter à la théorie de M. Karsten, que si une haute température est nécessaire pour décarburer la fonte par l'oxygène des scories, il convient que la fonte grise,

---

la proportion de fer oxydé devant la tuyère sera plus considérable. Le courant de gaz sortant du fourneau aura donc, toutes choses égales d'ailleurs, une température propre d'autant plus élevée, que la quantité de fer brûlée aura été plus grande.

Le refroidissement du creuset, dans cette allure du haut fourneau, est une conséquence nécessaire de l'action du silicate de fer résultant de cette oxydation sur le carbone de la fonte.

L'emploi de l'air chaud est le meilleur moyen qu'on puisse employer pour modifier cette mauvaise allure. Il agit évidemment en diminuant l'étendue de la zone oxydante.

Les mêmes considérations permettent d'expliquer l'abaissement brusque de température qu'on observe dans les fours à réverbère chauffés par les gaz d'un haut fourneau, toutes les fois que celui-ci présente quelque dérangement.

Les moindres chutes de minerais devant la tuyère se font sentir dans l'allure des fours d'une manière très-marquée. S'il s'oxyde du fer en proportion un peu considérable devant la tuyère, il est certain que la quantité d'oxyde de carbone, qui est proportionnelle à l'oxygène introduit par le courant d'air, sera diminuée de tout l'oxygène qui s'est combiné au fer devant la tuyère, et la valeur combustible du gaz diminuera dans le même rapport. Pour une chute de minerai de peu de durée, la chaleur ne montera pas sensiblement, en raison de la masse des matières contenues dans le haut fourneau, et le seul symptôme du dérangement sera la diminution dans la proportion d'oxyde de carbone contenue dans le gaz.

(1) *Manuel de la Métallurgie du fer*, t. III, p. 54. Traduction française.

dont l'affinage est plus long et plus difficile que celui de la fonte blanche, soit exposée à une température plus élevée que cette dernière. Il paraît en effet bien probable, d'après la manière dont la combustion s'opère dans le creuset, qu'en rapprochant des tuyères le bain de métal on rend sa température plus élevée.

Pendant ces dernières années, on a fait dans les forges de la Franche-Comté un grand nombre d'essais pour remplacer le charbon dans les feux d'affinerie par du bois vert ou desséché. Les résultats en ont été décrits dans le Mémoire de M. Thirria, ainsi que ceux obtenus de l'emploi de l'air chaud (*Annales des Mines*, tome XVIII, pages 336 et suivantes). Plusieurs des procédés auxquels ces essais ont donné lieu ont été appliqués dans de nombreuses usines pendant des années entières, mais on en est revenu maintenant à peu près partout à l'emploi exclusif du charbon de bois. On conçoit que l'introduction dans le foyer d'un combustible à flamme comme le bois devait amener de graves modifications dans la conduite et l'allure du feu, dans la température du vent. Mais la discussion de toutes ces modifications au travail habituel m'entraînerait trop loin, et je me contente de les indiquer ici sans m'y arrêter davantage.

Emploi des chaleurs perdues des feux d'affinerie.

La disposition intérieure des fours dans lesquels on utilise les flammes qui s'échappent des feux d'affinerie est variable suivant l'usage auquel on les destine. Mon but, dans ce travail, n'est pas de décrire avec détail les dimensions qu'on leur donne dans les différents cas qui se présentent. Je ferai seulement remarquer que ces fours sont disposés tantôt de manière à porter rapidement le fer à une température élevée, tantôt de manière à éviter le plus possible son oxydation et le déchet qui en résulte. Le four représenté (*fig.* 1, 2, 3, p. 551 et 552), et qui sert à réchauffer des

barreaux pour fabriquer de petits fers, est dans le premier cas. On peut remarquer qu'il n'y a pas d'autel, que la voûte est très-rapprochée de la sole, et qu'ainsi le courant de gaz venant du foyer est en contact immédiat avec le fer. Le registre placé sur la cheminée sert à régler l'introduction de l'air qui doit se mélanger avec les gaz pour les brûler, et cette quantité doit varier, comme on l'a vu d'après la composition des gaz, aux différentes époques de l'affinage.

Les fours à réchauffer la tôle diffèrent des précédents : 1° en ce que le registre placé dans la cheminée est toujours fermé, de sorte que la totalité des flammes sort par les portes du four; 2° en ce que le four est divisé en deux ou trois compartiments, séparés les uns des autres par des autels en briques. Les gaz arrivent dans les deux derniers compartiments par une ouverture de $0^m,10$ de hauteur sur toute la largeur du four, comprise entre l'autel et la voûte, et celle-ci se trouve à $0^m,35$ au-dessus de la sole. Il résulte de cette disposition que le courant de gaz passe d'un compartiment à l'autre en suivant la voûte du four sans être en contact immédiat avec les feuilles de tôle placées sur la sole et qui ne s'échauffent guère que par le rayonnement de la voûte. Les gaz les plus échauffés se maintiennent à la partie supérieure du four, et l'atmosphère qui entoure les feuilles de fer ne se renouvelle que lentement. Le laminage des tôles n'exige pas une température très-élevée, et on cherche, par les moyens que je viens d'indiquer, à éviter l'oxydation à la surface des feuilles et le déchet considérable qui en résulterait.

Analyse des gaz des fours de la tôlerie.

On a aspiré ce gaz aux différentes époques de l'affinage, à l'entrée du premier compartiment du four à chaleur perdue servant au laminage de la tôle. On a profité du moment où il n'y avait pas de fer dans le four, afin de ne pas com-

pliquer les résultats des analyses de l'action des gaz sur le fer. — Dans toutes les expériences, le registre placé à l'extrémité du four est resté complétement fermé, en sorte que les gaz sortaient en totalité par les portes.

On a obtenu dans quatre expériences les nombres :

		(17)	(18)
Gaz		$1^{lit},565$	$1^{lit},580$
Baromètre		$0^{m},736$	$0^{m},730$
Thermomètre		12°,5	14°
Gaz ramené à 0° et à $0^{m},760$		$1^{lit},449$	$1^{lit},444$
Acide carbonique		gr 0,306	gr 0,349
Produits de combustion.	Eau	0,049	0,037
	Acide carbonique	0,468	0,369
	Oxygène absorbé	0,209	0,165
Azote dosé directement		67,9	72,5

		(19)	(20)
Gaz pour l'analyse		$1^{lit},600$	$1^{lit},565$
Baromètre		$0^{m},733$	$0^{m},733$
Thermomètre		11°,4	13°,8
Gaz ramené à 0° et à $0^{m},760$		$1^{lit},481$	$1^{lit},431$
Acide carbonique		gr 0,436	gr 0,476
Produits de la combustion.	Eau	0,038	0,001
	Acide carbonique	0,184	0,013
	Oxygène absorbé	0,080	—0,030
Azote dosé directement pour 100 volumes de gaz sec		74,8 75,4	82,0 80,8

On tire de là :

	(17)	(18)	(19)	(20)
Acide carbonique	10,66	12,21	14,87	16,79
Oxyde de carbone	16,34	12,91	6,27	0,46
Hydrogène	4,18	3,18	3,18	0,00
Oxygène	»	»	0,90	1,45
Azote	68,82	71,70	74,78	81,30
	100,00	100,00	100,00	100,00

(17). Le gaz est pris dans le four au moment où l'

vrier rapporte les deux lopins au feu; celui-ci est recouvert d'une grande épaisseur de charbon. Il sort une flamme bleue à bords rouges par la porte du four.

(18). Gaz aspiré pendant le forgeage du premier bout de barre, 35 minutes après le commencement de l'opération. La flamme qui sort par la porte du four est plus blanche et moins allongée que dans l'expérience précédente, mais la température du four paraît plus élevée.

(19). Gaz pris 1 heure 15 minutes après le commencement de l'affinage, pendant le forgeage du dernier bout de barre. Le feu n'est plus garni de charbon, et le vent le soulève par intervalles. Pendant le commencement de la prise de gaz, une flamme bleuâtre sort par la porte du four, mais cette flamme devient courte et jaunâtre à la fin de l'expérience. Cette circonstance explique la coexistence de gaz combustibles et d'une quantité sensible d'oxygène dans le gaz analysé.

(20). Gaz aspiré pendant le travail de la pièce, 10 minutes avant la fin de l'affinage. Le four est beaucoup moins chaud que dans l'expérience précédente, et il ne sort pas de flamme par la porte.

Bien que les résultats de ces analyses ne puissent pas représenter exactement la composition moyenne des gaz qui se dégagent du foyer d'affinerie, à raison de l'air extérieur qui s'y mélange nécessairement dans une certaine proportion, ils montrent toutefois de quelle manière cette composition varie dans les différentes périodes de l'affinage, et les conséquences qu'on peut en déduire ne diffèrent en rien de celles qui ont été présentées plus haut.

Analyse des gaz des fours du petit étirage.

La composition des gaz qui circulent dans les fours servant à la fabrication du petit fer dépend non-seulement de l'époque de l'opération, mais encore de l'ouverture plus ou moins complète du registre placé à l'origine de la chemi-

née. On règle cette ouverture de façon à ce qu'il sorte toujours une petite flamme bleuâtre à bords orangés par la porte du four. Pendant la première période de l'opération, celle qui correspond à la fusion de la fonte, le registre est ouvert d'une certaine quantité, mais on le ferme entièrement pendant le travail de la pièce.

La composition de l'atmosphère de ces fours a été déterminée comme il suit dans deux analyses.

		(21)	(22)
Gaz pour l'analyse		$1^{lit},575$	$1^{lit},560$
Baromètre		$0^{m},738$	$0^{m},736$
Thermomètre		14°	12°
Gaz ramené à 0° et à $0^{m},760$		$1^{lit},455$	$1^{lit},437$
		gr	gr
Acide carbonique		0,442	0,468
Produits de la combustion.	Eau	0,043	0,002
	Acide carbonique	0,250	0,034
	Oxygène absorbé	+0,124	—0,028
Dosage direct d'azote		73,5	81,8

On déduit de ces nombres les compositions suivantes :

	(21)	(22)
Acide carbonique	15,34	16,44
Oxyde de carbone	8,68	1,12
Hydrogène	3,66	0,17
Oxygène	»	2,02
Azote	72,32	80,25
	100,00	100,00

(21). Gaz pris pendant le réchauffage des deux lopins, 20 minutes après la mise en feu. Le registre est ouvert au tiers, et une flamme bleuâtre sort par la petite porte du four.

(22). Gaz aspiré à la fin du travail de la pièce, le registre étant tout à fait fermé.

Ces expériences suffiront pour montrer la différence qui existe dans la composition des gaz des fours à registre fermé et de ceux à registre ouvert. On voit, comme on pouvait s'y attendre, que dans le commencement de l'affinage

ceux-ci (21) renferment beaucoup moins de gaz combustibles que quand le registre est fermé (17), (18). Aussi la température des fours à registre ouvert est-elle toujours bien supérieure à celle des fours à tôle où la température ne dépasse pas le rouge-cerise. Pendant le travail de la pièce, il y a identité de composition dans l'atmosphère des deux espèces de fours (20); (22).

La température des fours à chaleur perdue varie beaucoup pendant les diverses périodes du travail, surtout dans les fours à registre. La température paraît être à son *maximum* au moment du désornage, mais elle s'abaisse très-notablement pendant tout le travail de la pièce qui dure 25 ou 30 minutes (1).

Ce résultat paraît, au premier aperçu, difficile à concilier avec les analyses des gaz pris dans le four aux diverses époques de l'affinage. Il semble que le maximum de température doive correspondre à la combustion la plus complète du gaz, et c'est à la fin de l'affinage que cette circonstance a lieu. La proportion de l'oxygène resté libre est peu considérable, et on expliquerait difficilement l'abaissement de température qui se produit par la présence de 8 ou 10 pour 100 d'air non désoxygéné qui se trouve dans le gaz. Le volume des gaz qui se dégagent du foyer d'affinerie est au moins aussi considérable à la fin qu'au commencement de l'opération, puisqu'on donne tout le vent à cette époque.

La disposition du foyer d'affinerie, par rapport aux fours placés à sa suite, me paraît être la cause de cette variation

(1) J'ai cherché à déterminer approximativement la température des fours d'étirage, en y introduisant de petits creusets contenant divers métaux inégalement fusibles. Le cuivre et l'or fondent facilement pendant le forgeage des barres dans le foyer d'affinerie, mais ils ne fondent plus à la fin du travail de la pièce. L'argent y fond au contraire dans toutes les périodes du travail.

La température s'élève quelquefois assez pour produire la fusion de la fonte, mais ce fait ne s'est présenté dans aucune de mes expériences.

dans leur température. On peut remarquer que la distance du fond du creuset à la voûte est d'environ $1^m,30$, ou de $1^m,10$ entre la voûte et les tuyères. Au commencement de l'affinage, quand le foyer est bien garni de charbon, la distance entre la surface des charbons et de la voûte n'est plus que de $0^m,70$ à $0^m,80$. Les gaz qui s'échappent du foyer renferment, comme on l'a vu, peu d'acide carbonique et beaucoup d'oxyde de carbone et d'hydrogène. Leur température propre est peu élevée, parce qu'ils traversent une épaisseur assez considérable de charbon qui n'a pas encore rougi et qui se distille avec absorption de chaleur latente. L'air qui produit la combustion du gaz ne peut pénétrer que par l'ouverture antérieure du foyer et par le trou de la gueuse, et son mélange avec le gaz ne s'opère bien que dans l'espace rétréci par lequel ils entrent ensemble dans le four à chaleur perdue. Le lieu de la combustion se trouve donc situé à l'entrée du four et à une petite distance du fer à réchauffer.

Pendant la deuxième période de l'affinage, le niveau du charbon ne dépasse guère celui des tuyères et sa distance à la voûte est de 1 mètre. On cherche autant que possible à éviter l'accès de l'air extérieur, et celui qui est projeté par la tuyère suffit pour rendre la combustion complète. Ici la température du courant de gaz est un *maximum* à une faible distance des tuyères, et elle s'abaisse continuellement jusqu'à son entrée dans le four par l'absorption de chaleur produite par les parois verticales et par la voûte du foyer. Celles-ci s'échauffent beaucoup pendant le travail de la pièce, soit par contact avec le courant de gaz, soit par le rayonnement du charbon embrasé à la surface du feu. Elles se refroidissent au contraire dans le commencement de l'affinage, tandis que le contraire a lieu pour l'intérieur du four à chaleur perdue.

On s'arrange de façon à ce que le réchauffage du fer dans le four à chaleur perdue s'opère d'une manière concordante

avec la marche de l'affinage. Ainsi on charge les barreaux de fer à étirer pendant le travail de la pièce, et on les passe au laminoir pendant la première période de l'affinage suivant. Le réchauffage du fer s'opère donc dans une atmosphère dont la température va constamment en augmentant. Cette manœuvre présente aussi l'avantage de diminuer le déchet, parce que l'oxydation du fer est d'autant plus rapide qu'il y a moins d'oxyde de carbone dans le gaz, et que la température est plus élevée.

La formation des battitures à la surface des barreaux et des feuilles de tôle s'opère en grande partie par la décomposition de l'acide carbonique et de la vapeur d'eau. Une feuille de tôle chauffée dans le four à chaleur perdue du petit étirage pendant la durée du forgeage des lopins et dans une atmosphère qui contenait une proportion assez considérable d'oxyde de carbone et d'hydrogène, (21), s'est couverte d'écailles très-épaisses d'oxyde. L'action oxydante ne peut pas être attribuée à l'oxygène libre qu'on ne trouve dans les fours qu'à la fin de l'affinage. Cette expérience prouve la nécessité d'échauffer par le rayonnement seul les pièces d'une faible épaisseur et à grande surface, en suivant les principes indiqués plus haut pour la construction des fours à tôle.

Il n'est pas possible d'apprécier exactement, par des déductions théoriques, le rapport de la quantité de chaleur perdue avec celle utilisée dans le foyer d'affinerie. Cette comparaison, facile à faire quand il s'agissait des gaz des hauts fourneaux, serait ici sans intérêt. Dans le feu d'affinerie, il est évident que la quantité de chaleur développée par la combustion du charbon se retrouve à peu près tout entière, soit à l'état de calorique sensible, soit à l'état latent, dans les gaz qui se rendent dans les fours. La chaleur rayonnée par le charbon incandescent et qui s'échappe par l'ouverture de travail, et celle que possède la masse ferreuse à sa sortie du creuset, sont les principales causes de déperdi-

tion. Mais on concevra facilement que la disposition du foyer par rapport aux fours et la composition, variable aux différentes époques du travail, des produits de la combustion, ne permettent pas d'utiliser une fraction de la chaleur développée, aussi grande que si le combustible était spécialement employé au service du four. La seule manière d'obtenir ce coefficient consiste à déterminer, comme l'a fait M. Thirria, la quantité de houille que l'on consommait antérieurement pour produire les effets obtenus de l'emploi des chaleurs perdues, et à considérer l'équivalent calorifique de cette houille comme représentant la chaleur utilisée dans les fours à la suite des feux d'affinerie. M. Thirria a trouvé ainsi que cette quantité de houille représentait moyennement les 0,70 de la valeur calorifique du charbon brûlé pour l'affinage.

L'application des chaleurs perdues des feux d'affinerie à tous les usages qui n'exigent pas une température très-élevée, a donné des résultats fort avantageux et devenus tout à fait pratiques. Des essais isolés ont été tentés dans diverses usines pour les utiliser, soit pour le puddlage de la fonte, soit pour le soudage du fer affiné; mais il ne paraît pas qu'aucun d'eux ait réussi. Il est vrai que l'on n'a pas encore employé, pour brûler les gaz du feu de forge, un courant d'air chaud projeté à la fois par plusieurs orifices, comme cela se pratique maintenant pour la combustion des gaz des hauts fourneaux; mais il est fort douteux que cette addition permette d'arriver à une température suffisamment élevée. La composition des gaz qui s'échappent d'un feu de forge est tellement variable du commencement à la fin de l'opération, qu'il serait bien difficile de régler convenablement l'écoulement de l'air comburant. On conçoit surtout la difficulté qu'on éprouverait à faire marcher ensemble deux opérations, dont chacune exige que l'ouvrier règle à sa volonté la température dans le foyer ou le four qu'il dirige. On a proposé d'accoler deux feux pour alimenter un

four de puddlage, et de combiner la marche de l'affinage dans chaque foyer, de façon à égaliser la température dans le four à réverbère. Cette disposition présenterait quelques chances de réussite, surtout si l'on parvenait à brûler les gaz par un courant d'air chaud et comprimé; mais le défaut d'homogénéité du combustible gazeux sera toujours un grand obstacle au succès de l'opération.

Résumé.

On peut résumer ainsi qu'il suit les principaux résultats de ce travail.

1°. Dans un foyer d'affinerie à deux tuyères, le lieu du maximum de température, déterminé par la position que l'on fait prendre au prisme de fer à souder, correspond, dans la composition du courant de gaz provenant des tuyères, à la transformation de l'oxygène de l'air en acide carbonique.

2°. La fonte placée au contrevent fond dans une atmosphère dépouillée d'oxygène libre et qui renferme seulement une petite proportion d'acide carbonique. L'influence oxydante de cette atmosphère ne peut être que très-faible, et la décarburation doit s'opérer surtout par l'oxygène des scories riches qui fondent avec la gueuse.

3°. La décarburation de la fonte par l'oxyde de fer des scories produit une absorption considérable de chaleur latente.

4°. Dans le travail de la pièce, il y a une oxydation considérable de fer par l'air projeté par les tuyères, production d'une température très-élevée par cette combustion dans l'intérieur de la loupe, et formation de scories très-basiques qui terminent la décarburation.

5°. La composition des gaz qui se dégagent des feux d'affinerie est variable, d'un point à un autre du foyer et du commencement à la fin de l'affinage, entre des limites fort étendues. Leur composition moyenne est caractérisée dans

la première période de l'affinage par une proportion considérable de gaz combustibles, tandis qu'à la fin du travail ils renferment une quantité notable d'oxygène libre.

6°. La température des fours à chaleur perdue varie avec la composition des gaz produits aux différentes époques de l'affinage. Leur disposition intérieure doit être calculée, tantôt de manière à porter rapidement le fer à une température élevée, tantôt de façon à éviter son oxydation et le déchet qui en résulte.

TROISIÈME DIVISION.

COMPOSITION DES GAZ PRIS DANS LES CHEMINÉES DES FOURS EMPLOYÉS DANS LES ARTS INDUSTRIELS.

I.

Expériences sur la composition de l'air des cheminées.

Les seules expériences qui auraient été faites, à ma connaissance, sur la composition de l'air des cheminées, sont dues à M. Péclet (1). Les gaz ont été recueillis dans des cheminées de foyers de chaudières à vapeur, en renversant un flacon plein d'eau dans le courant d'air sortant de la cheminée. Le gaz ainsi obtenu a été traité successivement par la potasse et par le phosphore. M. Péclet avait conclu de ces essais que la proportion d'air qui échappait à la combustion était ordinairement la moitié de la quantité aspirée par le tirage, et seulement le tiers dans le cas où le tirage était très-fort.

Les expériences dont il est ici question ont été faites sur la composition de l'air de deux cheminées, l'une servant à un four à puddler, l'autre à un four à réchauffer le fer.

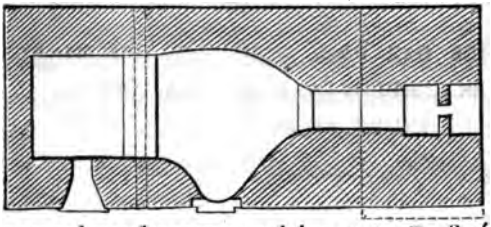
1°. *Four à puddler.*

Le four à puddler, sur lequel j'ai opéré, est représenté en plan par la *fig.* 1 et en coupe longitudinale par la *fig.* 2. L'échelle est de $0^m,015$ pour mètre.

(1) *Traité de la Chaleur*, t. I, p. 299; 1re édition.

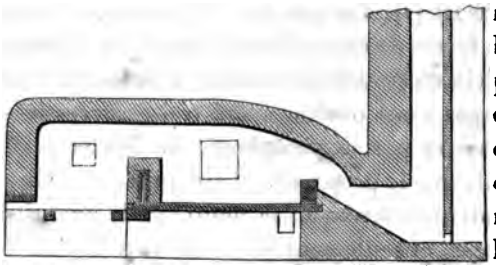
La cheminée a $11^m,64$ d'élévation; la grille a $0^m,80$ de longueur, dans le sens de l'axe du four, sur une largeur de $0^m,97$. Cette grille est formée par 11 barreaux de $0^m,055$ de largeur sur $0^m,025$ d'épaisseur. Les 12 espaces vides entre deux barreaux voisins ont $0^m,0304$ l'un, quand les barreaux sont neufs. La distance du seuil de la porte de chargement à la grille est de $0^m,30$. La hauteur du charbon sur la grille est généralement de $0^m,20$.

Fig. 1.



On charge dans le four à puddler 195 kilogrammes de fonte contenant ordinairement 0,75 fonte brute et 0,25 de fin métal. L'opération dure deux heures, y compris la réparation du four après chaque charge. On conduit cette opération comme à l'ordinaire. La consommation moyenne en fonte est de 1,094 aux 1,000 kilogrammes de fer puddlé. On consomme en houille menue de Rive-de-Gier, 960 kilogrammes aux 1,000 kilogrammes de fer produit.

Fig. 2.



On charge ordinairement de la houille sur la grille de dix en dix minutes.

Pour avoir des gaz, on a percé un trou au fleuret dans la maçonnerie de la cheminée, puis on a introduit dans cet orifice un tube de porcelaine dont toute la partie plongée dans le courant de gaz était recouverte d'une feuille de platine. Un tube nu aurait éclaté à la première impression

de la chaleur. Pour empêcher l'aspiration de l'air qui s'opère par l'orifice qu'on vient d'ouvrir (1), on lutait avec de la terre l'intervalle compris entre le tube de porcelaine et les parois du trou. Le tube de porcelaine était mis en communication, à l'aide d'un tuyau de plomb et d'assemblages en caoutchouc, avec un aspirateur double décrit et figuré page 557.

Pour analyser les gaz, j'ai employé les mêmes procédés que pour les gaz des hauts fourneaux. Seulement, le tube à combustion renfermait du cuivre métallique sur les deux tiers environ de sa longueur et de l'oxyde noir sur le reste. Le passage du gaz à travers ce tube le dépouillait d'oxygène libre, que l'augmentation de poids du tube à combustion permettait de doser. Dans leur passage à travers le tube à combustion, les gaz combustibles se changeaient en eau et en acide carbonique, qu'on pouvait recueillir dans les appareils placés à la suite, et la variation de poids de ces appareils, comparée à celle du tube à combustion, permettait de doser simultanément les gaz combustibles et l'oxygène libre.

J'ai obtenu, dans cinq expériences, les résultats suivants :

		(1)	(2)	(3)
Gaz pour l'analyse		$1^{lit},500$	$1^{lit},485$	$1^{lit},480$
Baromètre		$0^{m},756$	$0^{m},759$	$0^{m},758$
Thermomètre		23°,5	20°	22°
Gaz ramené à 0° et à $0^{m},760$		$1^{lit},373$	$1^{lit},382$	$1^{lit},366$
Acide carbonique		gr 0,356	gr 0,444	gr 0,418
Produits de la combustion.	Eau	»	0,004	0,001
	Acide carbonique	0,005	0,041	0,013
	Oxygène abs. (2)	—0,093	—0,004	—0,042

(1) En adaptant à cet orifice un tube manométrique contenant de l'eau, on trouve que la différence de niveau des deux branches est constamment comprise entre 1 ½ et 2 centimètres d'eau.

(2) Le signe — indique une augmentation dans le poids du tube à combustion.

		(4)	(5)
Gaz pour l'analyse		1lit,560	1lit,500
Baromètre		0m,753	0m,751
Thermomètre		18°	15°,2
Gaz ramené à 0° et à 0m,760		1lit,450	1lit,404
		gr	gr
Acide carbonique		0,463	0,421
Produits de la combustion.	Eau	0,001	0,001
	Acide carbonique	0,008	0,035
	Oxygène	—0,052	—0,017

On tire de là :

	(1)	(2)	(3)
Acide carbonique	13,09	16,23	15,45
Oxyde de carbone	0,18	1,49	0,48
Hydrogène	»	0,36	0,08
Oxygène	4,81	0,96	2,47
Azote	81,92	80,96	81,50
	100,00	100,00	100,00

	(4)	(5)
Acide carbonique	16,13	15,14
Oxyde de carbone	0,28	1,25
Hydrogène	0,10	0,10
Oxygène	2,59	1,44
Azote	80,90	82,07
	100,00	100,00

(1) Gaz aspiré 15 minutes après qu'on a chargé la fonte. On charge la grille pendant l'expérience.

(2) Gaz aspiré 20 minutes après la charge en fonte dans le four. On décrasse la grille pendant l'expérience.

(3) La fonte est sur la sole du four depuis 35 minutes. Elle commence à entrer en fusion. La grille a été chargée de houille immédiatement avant l'aspiration du gaz, qui a duré 5 minutes. La température du four est très-élevée.

(4) Gaz aspiré 25 minutes après la charge en fonte. On met de la houille sur la grille immédiatement après la fin de l'aspiration.

(5) On charge la grille au commencement de l'aspira-

tion. L'ouvrier travaille dans le four pendant la moitié de l'aspiration, et laisse la petite porte du four fermée pendant l'autre moitié. On sort le métal du four 20 minutes après l'aspiration des gaz.

En comparant le volume de l'oxygène libre à celui de l'azote, il est facile de déduire des analyses qui précèdent la fraction du volume de l'air qui échappe à la combustion. A la suite du nombre qui représente l'air non brûlé, j'ai indiqué la proportion des principes combustibles qui restent dans le mélange gazeux.

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Volume d'air qui échappe à la combustion sur 100 volumes de gaz.	22,0	4,5	11,5	12,2	6,7
Gaz combustibles contenus dans 100 volumes du mélange.	0,18	1,49	0,56	0,38	1,35

Ce rapprochement montre déjà que la proportion de gaz combustibles augmente notablement dans le mélange gazeux aussitôt que la quantité d'oxygène libre diminue. Cette proportion devient très-faible quand l'air non brûlé s'élève aux 0,10 ou 0,12 de la quantité qui traverse la grille.

2°. *Four à réchauffer.*

Fig. 3.

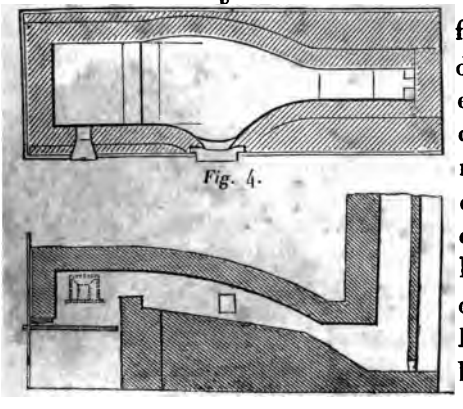


Fig. 4.

Le four à réchauffer, sur la cheminée duquel j'ai opéré, est représenté à l'échelle de $0^m,01$ pour mètre en plan *fig.* 3 et en coupe longitudinale *fig* 4. Il sert à la fabrication des fers de gros échantillons. La grille a $0^m,90$ de longueur sur $1^m,02$

de largeur. Les barreaux ont la même forme, les mêmes dimensions que ceux du four à puddler, et sont espacés de la même manière. La hauteur du seuil de la porte au-dessus de la grille, est de $0^m,38$; l'épaisseur de la houille sur la grille peut être en moyenne de $0^m,25$; la cheminée a 12 mètres d'élévation.

On charge dans le four de 300 à 650 kilogrammes de fer, suivant la grosseur de l'échantillon à laminer. On fait de 6 à 8 charges par postes de 12 heures. Le déchet sur le réchauffage peut être évalué en moyenne, pour le four dont il s'agit, à 8 ou 9 pour 100, et la consommation en houille de Rive-de-Gier à 400 ou 450 kilogrammes aux 1,000 kilogrammes de fer fabriqué.

Les gaz ont été aspirés dans la cheminée du four, comme ceux du four à puddler, et analysés de la même manière.

J'ai obtenu dans cinq expériences les résultats suivants:

		(6)	(7)	(8)
Gaz pour l'analyse		$1^{lit},310$	$1^{lit},570$	$1^{lit},545$
Baromètre		$0^m,758$	$0^m,755$	$0^m,754$
Thermomètre		24°	21°	25°
Gaz ramené à 0° et à $0^m,760$		$1^{lit},201$	$1^{lit},448$	$1^{lit},404$
		gr	gr	gr
Acide carbonique		0,296	0,446	0,465
Produits de la combustion.	Eau	0,029	0,010	»
	Acide carbonique.	0,179	0,122	0,016
	Oxygène absorbé.	+0,085	+0,035	—0,038

		(9)	(10)
Gaz pour l'analyse		$1^{lit},480$	$1^{lit},500$
Baromètre		$0^m,757$	0,753
Thermomètre		19°	18°,5
Gaz ramené à 0° et à $0^m,760$		$1^{lit},378$	$1^{lit},391$
		gr	gr
Acide carbonique		0,422	0,478
Produits de la combustion.	Eau	» »	0,007
	Acide carbonique	0,010	0,019
	Oxygène absorbé	—0,039	—0,011

Ces expériences conduisent aux compositions suivantes :

	(6)	(7)	(8)
Acide carbonique.....	12,44	15,55	16,72
Oxyde de carbone.	7,52	4,25	0,57
Hydrogène.....	3,04	0,86	»
Oxygène.....	0,20	0,81	2,13
Azote.....	79,80	78,53	80,58
	100,00	100,00	100,00

	(9)	(10)
Acide carbonique.....	15,47	17,35
Oxyde de carbone.....	0,36	0,69
Hydrogène	»	0,08
Oxygène.....	2,14	0,85
Azote.....	82,00	81,03
	100,00	100,00

(6) Gaz aspiré 10 minutes après la charge. Registre ouvert au sommet de la cheminée. On charge de la houille sur la grille avant de commencer l'aspiration.

(7) Gaz aspiré 25 minutes après la charge en fer. On charge la grille au milieu de l'aspiration.

Le four chauffait mal à l'époque où les prises de gaz (6) et (7) ont eu lieu.

(8) Gaz aspiré 15 minutes avant la sortie des paquets et 14 minutes et demie après leur introduction dans le four. Le four est très-chaud; l'ouvrier charge la grille au moment où l'aspiration vient de finir.

(9) Gaz aspiré $\frac{3}{4}$ d'heure après la charge. On charge la grille avant de commencer l'aspiration.

(10) Gaz aspiré 10 minutes avant la sortie des paquets. L'aspiration dure 6 minutes; on charge la grille avant de la commencer.

Nous pouvons faire ici le même rapprochement que pour le four à puddler, c'est-à-dire déterminer la fraction du volume d'air qui échappe à la combustion, et la comparer au volume des gaz combustibles qui restent dans le mélange.

On trouve ainsi :

	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
Fraction du volume d'air qui échappe à la combustion sur 100 vol.	1,0	3,9	10,0	9,9	3,9
Gaz combustibles contenus dans 100 volumes du mélange.	10,56	5,11	0,57	0,36	0,77

On peut déjà remarquer que la proportion d'air non brûlé est en moyenne sensiblement plus faible dans le cas du four à réchauffer que dans le cas du four à puddler (*).

Deux analyses ont aussi donné une proportion assez considérable de gaz combustibles, fait qui ne s'est pas rencontré dans le four à puddler.

Les résultats des expériences qui précèdent sur la composition de l'air des cheminées des fours à puddler et à réchauffer, établissent clairement que la proportion d'air qui échappe à la combustion est généralement une faible portion du volume total. Dans une seule expérience (1) les 0,20 de l'air aspiré ont passé sans altération. La moyenne des autres semble indiquer un excès d'air de 0,07 à 0,08 seulement. Il est, du reste, aisé de concevoir les légères variations que présente la composition de l'air des chemi-

(*) Il est bon de faire remarquer ici que le procédé d'analyse tend constamment à élever la proportion d'oxygène libre; malgré toutes les précautions prises pour expulser complétement l'air des appareils avant l'aspiration et avant l'analyse, il est extrêmement difficile d'arriver, sous ce rapport, à un résultat exact. Les nombreuses expériences que j'ai faites précédemment sur la composition des gaz qui ne renfermaient que de l'oxyde de carbone et de l'hydrogène, m'ont prouvé que la perte de poids du tube à combustion était constamment un peu plus faible que la perte calculée d'après la composition des gaz, mais l'erreur n'atteignait jamais 5 à 6 milligrammes. Si l'on faisait cette correction sur les nombres trouvés plus haut, on trouverait qu'il faudrait diminuer d'une unité le nombre qui représente le volume d'air échappé à la combustion; ce qui donnerait :

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
Air échappé à la combustion.	21,0	3,5	10,5	11,2	5,7	0,0	2,9	9,0	8,9	2,9

nées, d'une analyse à l'autre, et la coexistence des gaz combustibles et de l'oxygène libre. Ce résultat paraît dû à ce que l'air aspiré n'a pas, après son passage à travers la grille, la même composition sur toute la surface de celle-ci. Il y a excès d'air sur certains points, excès de gaz combustibles sur d'autres. Les parties dégarnies de charbon laissent passer proportionnellement beaucoup plus d'air non brûlé que les autres. Le mélange de l'air non brûlé avec les gaz combustibles, tels que l'oxyde de carbone et les produits de la distillation de la houille, ne s'opère qu'incomplétement, même à une grande hauteur dans la cheminée. Les flammes qui se prolongent sur toute la longueur de la sole prouvent bien clairement que la combustion continue d'y avoir lieu.

On conçoit aussi pourquoi l'air des cheminées des fours à réchauffer est sensiblement moins chargé d'oxygène libre que celui des fours à puddler. L'épaisseur de la houille sur la grille du four à souder est de 0,05 plus considérable que dans le four à puddler (1).

Quand l'air des cheminées contient les 0,07 à 0,08 d'air non désoxygéné, il ne renferme pas notablement de gaz combustibles, mais ceux-ci reparaissent en proportion bien plus grande quand l'air non brûlé n'est plus que les 0,02 à 0,03 du volume de l'air aspiré. L'emploi le plus avantageux du combustible correspondrait évidemment à une transformation réciproque et complète de l'oxygène de l'air et du combustible en eau et en acide carbonique. L'excès d'air abaisse inutilement la température du courant, mais la formation de l'oxyde de carbone est encore plus nuisible, puisqu'elle produit une absorption de chaleur latente. Dans les fours sur lesquels j'ai opéré, on n'est pas

(1) D'après M. Valérius (*Traité de la fabrication du fer en Belgique*, p. 511), l'épaisseur de la houille sur les grilles des foyers en Belgique est de $0^m,06$ à $0^m,08$ pour les chaudières à vapeur, de $0^m,15$ pour les fours à puddler, et de $0^m,20$ pour les fours à réchauffer.

loin ordinairement du maximum d'effet théorique, puisque l'excès d'air n'est en moyenne que les 0,07 ou 0,08 de l'air aspiré. Ce petit excès d'oxygène paraît nécessaire pour que les gaz combustibles ne se montrent pas dans le mélange en proportion notable.

La chaleur utilisée sur la sole des fours à haute température ne s'élève pas au delà des 0,08 ou 0,010 de la chaleur développée par le combustible; aussi l'emploi de la chaleur sensible que conserve le courant de gaz brûlés après son passage sur la sole a-t-il conduit à des résultats fort importants pour le chauffage des chaudières à vapeur. (Voir les Mémoires de MM. Flachat et Vuillemin, *Annales des Mines*, t. XVII, 3e série, et t. II, 4e série.)

J'ai dit plus haut que le chargement de la houille sur la grille avait lieu ordinairement toutes les huit ou dix minutes. Immédiatement après le chargement, on aperçoit au sommet de la cheminée une fumée noire qui ne persiste que pendant quelques secondes. La houille menue, aussitôt qu'elle est en contact avec le combustible incandescent placé sur la grille, laisse dégager beaucoup de produits de distillation qui se décomposent à leur passage sur la sole du four ou dans la cheminée avec dépôt de carbone très-divisé. L'effet observé est le même que si l'on faisait passer ces gaz et ces vapeurs à travers un tube de porcelaine fortement chauffé. Quand la proportion de ces produits de distillation est un peu diminuée, le carbone mis en liberté se dissout soit dans l'oxygène, soit dans l'acide carbonique du courant de gaz, et toute fumée disparaît. Cette fumée est beaucoup plus considérable et persiste pendant bien plus longtemps dans tous les foyers à grille où le combustible n'est pas employé à produire une température très-élevée, comme dans le chauffage des chaudières à vapeur, et ce qui précède en montre clairement la cause. Les expériences précitées de M. Péclet porteraient à admettre que la proportion d'air non brûlé doit être, dans ce cas, beaucoup plus considé-

rable que dans les fours à réverbère à température très-élevée.

La nature des houilles employées au chauffage des fours doit aussi faire varier la composition de l'air des cheminées. Une houille sèche ne se comportera pas sur la grille et n'agira pas sur l'air atmosphérique de la même manière qu'une houille grasse. De nombreuses expériences faites sur l'air des cheminées, en faisant varier la forme et les dimensions des grilles, la nature du combustible et des agents de combustion, l'air et la vapeur d'eau, conduiraient bien certainement à des résultats importants sur la théorie de la combustion dans les foyers à grille.

La disposition adoptée pour les fours à réverbère prouve qu'on a cherché, autant que possible, à éviter le contact direct de la flamme avec la matière à échauffer. L'élévation du four tend à diriger le courant de gaz le long de la voûte, en sorte que l'échauffement du fer sur la sole a principalement lieu par le rayonnement de la voûte. Le fer en contact avec le courant de gaz s'oxyderait nécessairement, soit par l'absorption de l'oxygène libre, soit par la décomposition de l'acide carbonique. Quand la masse du fer est considérable par rapport à sa surface, on ne craint pas l'oxydation du fer à l'extérieur, et l'on peut alors le mettre en contact avec les gaz, parce que son échauffement sera plus rapide. Quand, au contraire, la surface du fer est considérable par rapport à sa masse, dans le cas de la tôle par exemple, il est nécessaire, pour éviter un trop grand déchet, d'échauffer le métal autant que possible par rayonnement.

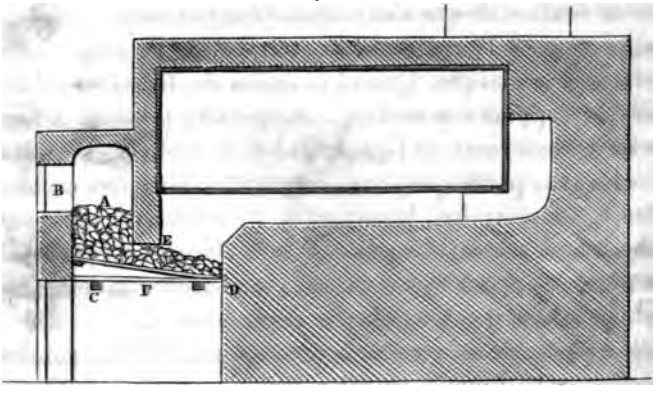
Il est probable qu'une étude plus approfondie des gaz des cheminées des fours à puddler fera reconnaître quelques variations dans leur composition correspondantes aux différentes périodes de l'affinage de la fonte et liées par conséquent aux réactions chimiques qui se produisent sur la sole du four.

On a vu plus haut que la fumée ne se produisait dans les

fours à réverbère, à puddler et à réchauffer qu'au moment où l'on charge le combustible sur la grille. Dans tous les foyers où les produits de la combustion ne traversent pas, avant d'arriver à la cheminée, un espace porté à une température très-élevée, il y a au contraire presque constamment de la fumée. Afin d'éviter cette perte de combustible, ainsi que l'incommodité qui en résulte pour les habitations voisines, on a essayé déjà plusieurs systèmes de foyers fumivores, et la Commission des machines à vapeur fait exécuter en ce moment une série d'expériences sur les nombreux procédés proposés en Angleterre pour cet objet. On me permettra d'indiquer ici le principe de la construction d'un foyer, qui me semble pouvoir être appliqué avantageusement au chauffage des chaudières, et qui produirait, je pense, la destruction complète de la fumée.

Ce foyer se composerait d'une cuve A représentée en coupe longitudinale *fig.* 5, à l'échelle de $0^m,02$ pour mètre,

Fig. 5.



dans laquelle on pourrait charger une certaine hauteur de combustible par la porte B, et d'une grille CD horizontale ou un peu inclinée, qui s'étendrait en avant de la projection de la cuve A, de façon à ce que le combustible vînt s'y étaler suivant un plan incliné DE, dont la hauteur EF

serait déterminée par l'expérience. Supposons la porte de chargement fermée et le tirage s'établissant à l'aide d'une cheminée; l'air aspiré ne pourra traverser que le combustible contenu dans le prisme triangulaire CDE, combustible qui a déjà perdu la totalité de ses matières volatiles par son séjour dans la partie supérieure de la cuve A. Les produits de la distillation, provenant de la houille supérieure au plan CE, seront obligés de traverser, en même temps que l'air atmosphérique, le combustible incandescent contenu dans l'espace CDE, et s'y brûleront complétement.

La construction de ce foyer diffère du mode actuel bien connu à combustion renversée, en ce que l'air est aspiré de bas en haut, comme dans les foyers à combustion directe, tandis que les produits de la distillation ont un mouvement de haut en bas, et viennent traverser le combustible carbonisé et incandescent placé sur la partie inférieure de la grille. Le principe du foyer que je propose est le même que celui du générateur de gaz à combustion renversée, que j'ai décrit (p. 495), et qui m'avait permis de transformer complétement le bois en gaz combustibles sans mélange de fumée. Ici j'ai dû indiquer la construction du foyer, de façon à ce que l'air soit introduit par le tirage d'une cheminée sans force motrice, et à ce que les produits de la combustion ne renferment pas sensiblement de gaz combustibles.

Le service du foyer que je propose n'exigerait, je crois, que peu de soin et de surveillance. Le chargement du combustible pourra, sans inconvénient, n'avoir lieu qu'à des intervalles assez éloignés les uns des autres. L'ouvrier devra seulement avoir le soin de faire descendre le combustible sur la grille, et il serait bon, pour cela, de ménager quelques ouvraux sur les parois latérales du foyer, etc.

II.

Expériences sur la composition des gaz qui s'échappent des foyers des machines locomotives.

(En commun avec M. Sauvage.)

Les résultats des recherches qui précèdent m'ont conduit à entreprendre, avec la collaboration de M. Sauvage, ingénieur en chef des Mines, une série d'expériences ayant pour objet l'analyse des produits gazeux de la combustion dans les foyers des machines locomotives. Les résultats obtenus dans un nombre considérable d'analyses font entrevoir la possibilité d'établir une théorie définitive de ces foyers intéressants qui, jusqu'à ce jour, ont été construits d'après des idées souvent contradictoires. On peut affirmer déjà qu'ils sont bien plus parfaits qu'on n'est généralement porté à le croire, et que la combustion y est beaucoup plus complète que dans les foyers des machines fixes à vapeur.

Les analyses des gaz ont été faites par les méthodes eudiométriques que la science doit à MM. Regnault et Reiset. Nous les avons employées déjà pour contrôler par une méthode aussi précise que possible les conclusions que mes premières recherches sur la théorie des hauts fourneaux m'avaient conduit à admettre (p. 417). Je n'ai cru devoir présenter ici ni la description de cette méthode, ni les détails des expériences. Nous nous bornerons à transcrire le résumé succinct des observations que ce travail nous a permis de recueillir (1).

(1) Ce Mémoire n'avait pas été rédigé par l'auteur. Les conclusions qu'il présente sont extraites de la Notice nécrologique sur M. Ebelmen, rédigée par M. Sauvage, son collaborateur et son ami. (*Annales des Mines*, p. 77, 1853.) Elles sont assez importantes pour que le nom de M. Ebelmen reste attaché, de droit comme de fait, aux progrès que l'établissement des foyers des machines fixes ou mobiles réalisera prochainement. SALVÉTAT.

L'expérimentation a été faite sur les trois types de machines locomotives du chemin de Lyon :

Machines à voyageurs à roues libres;

Machines mixtes à quatre roues accouplées;

Machines à marchandises à six roues accouplées.

La composition et la nature des gaz varient nécessairement avec la quantité d'air qui traverse le combustible, et cette quantité dépend, comme on le sait, de la tension de la vapeur au sortir de l'orifice d'échappement. La proportion de l'acide carbonique que les gaz contiennent est, en général, plus grande que dans les foyers ordinaires des machines fixes, tandis que la proportion d'oxygène libre correspondant à l'excès d'air appelé y est moindre; ce résultat est évidemment en rapport avec un accroissement de l'effet utile du combustible.

1°. Dans les expériences sur les machines à voyageurs et sur les machines mixtes, la proportion de l'acide carbonique s'est élevée de 12,42 à 18,49 pour 100 du volume des gaz sans qu'il y ait eu aucune production d'oxyde de carbone : et ce résultat se rapproche d'une manière très-remarquable du nombre 20,80 qui représente la proportion d'acide carbonique dans une combustion *théorique* où tout l'oxygène de l'air serait transformé en acide carbonique.

La combustion se fait avec d'excellents résultats dans les machines à voyageurs et dans les machines mixtes, pourvu que le feu y soit conduit selon certains principes bien définis aujourd'hui, selon certaines règles que les meilleurs mécaniciens pratiquent. Ces foyers ne produisent presque point d'oxyde de carbone; il est rare en effet que dans nos expériences la proportion de ce gaz ait dépassé 2 pour 100.

2°. Les machines à marchandises, dont le foyer plus profond est souvent chargé d'une grande épaisseur de coke, produisent une plus forte quantité d'oxyde de carbone; la

quantité s'est élevée souvent jusqu'à 7,58 pour 100 avec une charge de coke de 1^{m},09. La composition des gaz varie d'ailleurs dans les différentes rangées de tubes. Il ne sera certainement pas impossible de trouver telle disposition qui permette de brûler utilement cet oxyde de carbone et d'améliorer ainsi la combustion dans ces machines.

3°. Pendant le stationnement des locomotives ou après la fermeture du régulateur, les gaz présentent une proportion plus forte encore d'oxyde de carbone; elle peut aller jusqu'à 12 pour 100 de leur volume. Ces résultats sont parfaitement d'accord avec les différences de consommation qu'on observe dans la pratique de la conduite de ces diverses machines. Ils indiquent une limite de hauteur de coke sur la grille qu'il est nuisible de dépasser, et toute l'économie qu'on peut attendre de l'emploi intelligent de la détente et de l'échappement variable pour régler convenablement le tirage d'après la hauteur du combustible.

FIN DU DEUXIÈME ET DERNIER VOLUME.

TABLE ALPHABÉTIQUE ET RAISONNÉE

DES

MATIÈRES CONTENUES DANS LES DEUX VOLUMES.

A.

ACIDE ACÉTIQUE.
— Sa formation par suite de l'altération du bois de chêne sous l'influence du plomb métallique; t. I, p. 326.
— Sa formation par suite de la calcination du bois de chêne avec de la chaux; t. II, p. 101.
— Sa préparation économique au moyen des produits condensés pendant la carbonisation du bois en meule; t. II, p. 137.

ACIDE BORIQUE ANHYDRE.
— Son action sur l'alcool; t. I, p. 61 et 69.
— Son action sur l'esprit-de-bois; t. I, p. 70.
— Son action sur l'huile de pomme de terre; t. I, p. 71.
— Employé à la reproduction des matières naturelles cristallisées; t. I, p. 125.

ACIDE BORIQUE HYDRATÉ.
— Sa composition variable avec la température à laquelle on le soumet; t. I, p. 115.
— Variations dans sa capacité de saturation; t. I, p. 117.

ACIDE CARBONIQUE.
— Son rôle avec ou sans le concours de l'oxygène dans l'altération spontanée des roches; t. II, p. 42.
— Sa proportion diminuée dans l'air par suite de la vie végétale t. II, p. 48.
— Sa proportion augmentée dans l'air par suite de la vie animale; t. II, p. 48.
— Sa proportion augmentée dans l'air par suite des éruptions volcaniques; t. II, p. 49.

ACIDE CHLOROSULFURIQUE.
— Résultant de l'action du chlore sur l'éther sulfureux; t. I, p. 124.

ACIDE NIOBIQUE.
— Sa cristallisation au milieu de l'acide borique en fusion; t. I, p. 194.
— Sa cristallisation par la fusion avec le carbonate de potasse; t. I, p. 221.

ACIDE PYROLIGNEUX.
— Sa fabrication au moyen de la carbonisation du bois en meules; t. II, p. 137.

ACIDE SILICIQUE.
— La formule par laquelle il convient de représenter sa composition déduite de l'analyse des éthers siliciques; t. I, p. 98.
— Hydraté; hyalite artificielle; t. I, p. 90 et 102.
— Hydrophane; t. I, p. 95 et 102.
— Variations dans sa capacité de saturation; t. I, p. 98.
— Employé, en Chine, à la décoration de la porcelaine; t. I, p. 382.
— Insoluble dans les alcalis; provenant de l'altération spontanée du basalte de Kammer-Bull; t. II, p. 37.

ACIDE SULFHYDRIQUE.
— Nouveau mode d'emploi de ce gaz dans l'analyse; t. II, p. 239.
— Essais pour constater sa présence dans les gaz des hauts fourneaux; t. II, p. 349.
— Sa présence dans les combustibles gazeux provenant du coke; t. II, p. 517.

ACIDE SULFUREUX.
— Son emploi pour analyser les minerais de manganèse; t. I, p. 227.
— Essais pour constater sa présence dans les gaz des hauts fourneaux; t. II, p. 349.

ACIDE TANTALIQUE.
— Sa cristallisation au milieu de l'acide borique et du sel de phosphore; t. I, p. 195.

ACIDE TITANIQUE.
— Sa cristallisation au moyen des phosphates doubles de soude et d'ammoniaque; t. I, p. 193.
— Sa combinaison avec la chaux; préparation; t. I, p. 205.
— Sa cristallisation au sein du silicate de soude en présence de l'oxyde de fer; t. I, p. 206.

AFFINAGE.
— Du fer, pratiqué dans les mines d'Audincourt; t. II, p. 549.
— Théorie de cette opération métallurgique; t. II, p. 566.

AIR ATMOSPHÉRIQUE.
— Causes connexes avec l'altération des roches, qui tendent à modifier sa composition ; t. II, p. 47.

AIR CHAUD.
— Son effet sur la marche des hauts fourneaux ; t. II, p. 330.

ALCOOL.
— Son action sur l'acide borique anhydre ; t. I, p. 61.
— Son action sur le chlorure de silicium ; t. I, p. 76.
— Son action sur le chlorure de bore ; t. I, p. 106.

ALDÉHYDE CHLORÉ.
— Résultant de l'action du chlore sur l'éther sulfureux ; t. I, p. 124.

ALTÉRATION.
— Spontanée des minéraux de la famille des silicates ; t. II, p. 1.
— Spontanée des roches ignées ; t. II, p. 18.
— Spontanée des terrains gypseux et calcaires ; t. II, p. 81.

ALUMINATE DE BARYTE.
— Sa préparation ; t. I, p. 141.

ALUMINATE DE CADMIUM.
— Essai pour le préparer ; t. I, p. 164.

ALUMINATE DE CHAUX.
— Sa préparation ; t. I, p. 141.

ALUMINATE DE COBALT.
— Sa préparation ; t. I, p. 140.

ALUMINATE DE FER.
— Sa préparation ; t. I, p. 139.

ALUMINATE DE GLUCINE.
— Sa préparation ; t. I, p. 135.

ALUMINATE DE MAGNÉSIE.
— Coloré en rose, sa préparation ; t. I, p. 128 et 161.
— Coloré en bleu ; t. I, p. 132.
— Coloré en noir ; t. I, p. 134.
— Incolore ; t. I, p. 135.

ALUMINATE DE MANGANÈSE.
— Essai pour le préparer ; t. I, p. 139.

ALUMINATE DE ZINC.
— Sa préparation ; t. I, p. 162.

ALUMINE.
— Obtenue sous forme de cristaux par la fusion du borate de soude et de l'alumine; t. I, p. 154 et 187.
— Sa combinaison avec la magnésie, spinelle incolore; t. I, p. 135.
— Spinelle rose; t. I, p. 128 et 161.
— Spinelle bleu; t. I, p. 132.
— Spinelle noir; t. I, p. 134.
— Sa combinaison avec le fer; t. I, p. 139.
— Sa combinaison avec l'oxyde de manganèse, essai pour l'obtenir; t. I, p. 139 et 169.
— Sa combinaison avec l'oxyde de cobalt; t. I, p. 140.
— Sa combinaison avec la chaux, essais pour l'obtenir; t. I, p. 141.
— Sa combinaison avec la baryte, essais pour l'obtenir; t. I, p. 141.
— Sa combinaison avec la glucine; t. I, p. 135 et 165.
— Sa combinaison avec l'oxyde de zinc; t. I, p. 162.
— Sa combinaison avec l'oxyde de cadmium, essai pour la préparer; t. I, p. 164.
— Sa combinaison avec l'acide borique; t. I, p. 189.
— Conditions dans lesquelles elle cristallise; t. I, p. 193.
— Sa concentration dans les produits de l'altération spontanée des roches alumineuses; t. II, p. 40.

ALUN NATUREL.
— Extrait des eaux de lessivage des houilles fermentées; son analyse; t. I, p. 266.

APPAREIL.
— Employé pour déterminer la quantité de fer métallique contenue dans les minerais de fer qui ont été placés à diverses hauteurs du haut fourneau; t. II, p. 189.
— Pour faire l'analyse du cuivre gris; t. I, p. 314.
— Pour déterminer la composition des gaz qui s'échappent du gueulard des hauts fourneaux; t. II, p. 231.
— Pour prendre et analyser les gaz à diverses hauteurs des hauts fourneaux; t. II, p. 259.
— Pour transformer en gaz les combustibles solides; t. II, p. 452.
— Four à gaz; t. II, p. 459.
— Générateur de gaz, à cuve; t. II, p. 467.
— Générateur de gaz, à combustion renversée; t. II, p. 495.
— Générateur de Pont-l'Évêque, transformant le coke en combustible gazeux; t. II, p. 514.
— Générateur de gaz, de Bourguignon; t. II, p. 524.
— Générateur de gaz, d'Audincourt; t. II, p. 533.

APPAREIL.
— De M. Sire, pour fabriquer le fer; t. II, p. 540.
— Fours à puddler, composition des gaz qui s'en dégagent; t. II, p. 583.
— Fours à réchauffer, composition des gaz qui s'en dégagent; t. II, p. 589.
— Fumivores; t. II, p. 596.
— Machines locomotives, composition des gaz qui se dégagent des foyers de ces appareils; t. II, p. 598.

ARSENIC.
— Essais pour séparer l'arsenic du fer; t. I, p. 245.
— Essais pour séparer l'arsenic de l'étain; t. I, p. 247.

B.

BASALTE.
— Du Crouzet, sa composition; t. II, p. 20.
— Produits de son altération spontanée; t. II, p. 23.
— De Polignac, sa composition; t. II, p. 28.
— Produits de son altération spontanée; t. II, p. 29.
— Du Kammer-Bull, sa composition; t. II, p. 32.
— Produits de son altération spontanée; t. II, p. 34 et 36.
— De Linz, sa composition; t. II, p. 64.
— Produits de son altération spontanée; t. II, p. 66.

BITUMES MINÉRAUX.
— De Bastennes, son analyse; t. I, p. 332.
— De Pont-du-Château, son analyse; t. I, p. 333.
— Des Abruzzes, son analyse; t. I, p. 337.
— De Pontnavey, son analyse; t. I, p. 339.

BLANCS.
— Employés en Chine pour décorer la porcelaine; t. I, p. 391.

BLEU.
— Couleur bleue de moufle employée, en Chine, à la décoration de la porcelaine; t. I, p. 400.
— Couleur bleue de demi-grand feu employée, en Chine, à la décoration de la porcelaine; t. I, p. 434.
— Couleur bleue de grand feu employée, en Chine, à la décoration de la porcelaine; t, I, p. 450.
— Bleu soufflé; t. I, p. 454.

BOIS.
— Action de l'humidité en présence du plomb sur le bois de chêne; t. I, p. 326.
— Action de la chaux vive sur la sciure de bois de chêne; t. II, p. 101.
— Sa carbonisation en meule; t. II, p. 109 et 129.
— Sa carbonisation en vases clos; t. II, p. 115.
— Son emploi en nature dans les hauts fourneaux; t. II, p. 158.
— Sa carbonisation par les procédés de M. Popelin-Ducarre; t. II, p. 138.
— Sa carbonisation par une chaleur brusque; t. II, p. 177.
— Sa carbonisation dans le haut fourneau; t. II, p. 163, 172 et 294.
— Sa transformation en combustible gazeux par combustion à flamme directe; t. II, p. 481.
— Sa transformation en combustible gazeux par combustion à flamme renversée; t. II, p. 495.

BORATE AMYLIQUE.
— Ses propriétés, sa préparation; t. I, p. 71.
— Sa décomposition par la chaleur; t. I, p. 73.
— Protoborate, sa préparation, sa composition; t. I, p. 113.
— Densité de sa vapeur; t. I, p. 114.

BORATE D'ALUMINE.
— Sa préparation sous forme de cristaux; t. I, p. 189.

BORATE DE MAGNÉSIE ET DE PEROXYDE DE FER.
— Peroxyde de fer magnéso-borate; t. I, p. 178.

BORATE DE MAGNÉSIE ET D'OXYDE DE CHROME.
— Oxyde de chrome magnéso-borate; t. I, p. 176.

BORATE DE MAGNÉSIE TRIBASIQUE.
— Sa préparation; t. I, p. 175.

BORATE ÉTHYLIQUE.
— Ses propriétés, sa préparation; t. I, p. 62.
— Son analyse; t. I, p. 64.
— Sa décomposition par la chaleur; t. I, p. 67.
— Protoborate, sa préparation, sa composition, ses propriétés; t. I, p. 106.
— Densité de sa vapeur; t. I, p. 108.
— Autres borates; leur composition; t. I, p. 109.

BORATE MÉTHYLIQUE.
— Ses propriétés, son analyse; t. I, p. 70.

BORATE MÉTHYLIQUE.
— Sa décomposition par la chaleur; t. I, p. 71.
— Protoborate, sa préparation, sa composition; t. I, p. 110.
— Densité de sa vapeur; t. I, p. 112.

BOROMÉTHYLATES.
— Essais pour les préparer; t. I, p. 71.

BOROVINATES.
— Essais pour les préparer ; t. I, p. 69.

BOUTONS.
— Fabrication des boutons en pâte céramique, par M. Bapterosses; t. I, p. 588.

BRAISE.
— Sa transformation en combustible gazeux; t. II, p. 468.

BRAUNITE.
— Deutoxyde de manganèse provenant de l'altération du silicate de manganèse; t. II, p. 11.

BRIQUES.
— Histoire des progrès réalisés dans la fabrication des briques, tuiles, etc., depuis 1808; t. I, p. 490.

BROOKITE.
— Sa reproduction artificielle au moyen de l'oxyde de titane et du phosphate double de soude et d'ammoniaque; t. I, p. 194.

C.

CADMIE.
— Trouvée à Treveray (Meuse), son analyse; t. I, p. 304.

CAILLOUTAGES.
— Produits céramiques en faïence fine exposés à Londres, en 1851; t. I, p. 479.

CALCAIRE.
— Formation des terrains calcaires par le fait de l'altération des roches renfermant de la chaux; t. II, p. 3 et 45.
— Altération des calcaires pyriteux; t. II, p. 96.

CARBONATE DE BARYTE.
— Son emploi conjointement avec l'acide carbonique pour séparer, dans l'analyse chimique, la magnésie des alcalis; t. I, p. 249.

CARBONATE DE CHAUX.
— Produit de l'altération spontanée des roches calcaires; t. II, p. 3 et 45.

CARBONATE DE CHAUX ET DE MAGNÉSIE.
— De Melin, son analyse; t. I, p. 304.
— De Bucey-les-Gy; t. I, p. 305.

CARBONATE DE MAGNÉSIE.
— Produit de l'altération spontanée des roches magnésiennes; t. I. p. 3 et 45.

CARBONATE DE PLOMB.
— Sa formation pendant l'altération du plomb en contact avec le bois de chêne humide; t. I, p. 326.
— Employé, en Chine, pour la décoration des porcelaines (*Yuen-feng*); t. I, p. 382.

CARBONATE DOUBLE D'URANE ET D'AMMONIAQUE.
— Ses propriétés; t. I, p. 21.

CARBONATE DOUBLE D'URANE ET DE POTASSE.
— Ses propriétés; t. I, p. 19.

CARBONE.
— Sa chaleur de combustion; t. II, p. 156.

CARBONISATION.
— Du bois en meules; t. II, p. 109 et 129.
— Du bois en vases clos; t. II, p. 115.
— Procédés de carbonisation employés par M. Popelin-Ducarre dans la fabrication du charbon de Paris; t. II, p. 138.
— De la houille dans les fours à coke; t. II, p. 144.
— Du bois, par une chaleur brusque; t. II, p. 177.
— Du bois dans le haut fourneau; t. II, p. 163, 172 et 294.

CÉLADON.
— Couleur verte appliquée à la décoration de la porcelaine chinoise; t. I, p. 444.

CÉRAMIQUE.
— Aperçu général sur les arts céramiques; t. I, p. 457.
— Examen général des objets céramiques exposés à Londres, en 1851; t. I, p. 464.
— Histoire détaillée des progrès réalisés dans les arts céramiques depuis 1808; t. I, p. 488.
— Aperçu sur l'avenir des arts céramiques; t. I, p. 565.

CÉRAMIQUE.
— Récompenses accordées aux arts céramiques à l'Exposition de Londres, en 1851 ; t. I, p. 573.
— Boutons en pâte céramique fabriqués par M. Bapterosses; t. I, p. 588.

CHALEUR PERDUE.
— Détermination de la chaleur perdue par les gaz qui se dégagent des fours à coke ; t. II, p. 150.
— Détermination de la chaleur perdue par les gaz qui s'échappent du gueulard des hauts fourneaux ; t. II, p. 249.
— Détermination de la chaleur perdue entraînée par les gaz qui traversent les hauts fourneaux à différentes hauteurs ; t. II, p. 376.
— Emploi de la chaleur perdue des fours d'affinerie ; t. II, p. 574.

CHARBON DE BOIS.
— Sa préparation au moyen des meules ; t. II, p. 109 et 129.
— Sa préparation au moyen de la distillation en vases clos ; t. II, p. 115.
— Sa préparation au moyen d'une calcination rapide ; t. II, p. 177.
— Sa transformation en combustible gazeux ; t. II, p. 476.
— Sa transformation en combustible gazeux au moyen de l'air et de la vapeur d'eau ; t. II, p. 477.

CHARBON DE PARIS.
— Sa fabrication par les procédés de M. Popelin-Ducarre ; t. II, p. 138.

CHLORURE DE BORE.
— Sa préparation ; t. I, p. 106.
— Son action sur l'alcool ; t. I, p. 106.
— Son action sur l'esprit-de-bois ; t. I, p. 110.
— Son action sur l'huile de pomme de terre ; t. I, p. 113.

CHLORURE DE CARBONE (PERCHLORURE).
— Résultant de l'action du chlore sur l'éther sulfureux ; t. I, p. 124.

CHLORURE DE SILICIUM.
— Sa préparation ; t. I, p. 74.
— Son action sur l'alcool ; t. I, p. 76.
— Son action sur l'huile de pomme de terre ; t. I, p. 87.
— Son action sur l'esprit-de-bois ; t. I, p. 89.

CHLORURE DE SOUFRE.
— Son action sur l'alcool ; t. I, p. 118.

CHLORURE DE TITANE (PROTOCHLORURE).
— Sa préparation; t. I, p. 54.

CHLORURE DE TITANE (SESQUICHLORURE).
— Ses propriétés; t. I, p. 49.

CHROMITE DE CHAUX.
— Essais pour le préparer; t. I, p. 150.

CHROMITE DE FER.
— Sa reproduction au moyen de l'acide borique et d'une température élevée; t. I, p. 142.
— Fer chromé, contenant de l'alumine; t. I, p. 144.
— Fer chromé, sans alumine; t. I, p. 146.

CHROMITE DE MAGNÉSIE.
— Sa production artificielle par l'acide borique et une température élevée; t. I, p. 148.

CHROMITE DE MANGANÈSE.
— Sa préparation; t. I, p. 150.

CHROMITE DE ZINC.
— Essais pour le préparer; t. I, p. 170.

CHY-KAO.
— Sulfate de chaux employé, en Chine, dans la fabrication de la porcelaine; t. I, p. 374.

COKE.
— Sa fabrication à Seraing; t. II, p. 144.
— Sa transformation en combustible gazeux; t. II, p. 514.

COMBUSTIBLES.
— Leur influence sur la réduction des minerais de fer dans les hauts fourneaux; t. II, p. 221.

COMBUSTIBLES FOSSILES.
— Leur formation aux dépens de l'acide carbonique de l'air absorbé par les végétaux; t. II, p. 48.
— Leur transformation en combustible gazeux; t. II, p. 514.

COMBUSTIBLES GAZEUX.
— Provenant des hauts fourneaux au charbon de bois, leur emploi; t. II, p. 440.
— Provenant d'un fourneau à grille; t. II, p. 451.
— Provenant des hauts fourneaux qui marchent au coke; t. II, p. 457.

COMBUSTIBLES GAZEUX.
— Provenant d'un générateur à cuve, à combustion ordinaire; t. II, p. 469.
— Provenant d'un générateur de gaz à cuve, à combustion renversée; t. II, p. 495.
— Provenant du coke; t. II, p. 514.

COMBUSTION.
— Détermination de la chaleur de combustion des gaz qui se dégagent des fours à coke; t. II, p. 150.
— Chaleur de combustion du carbone; t. II, p. 156.
— Chaleur de combustion de l'oxyde de carbone; t. II, p. 156.
— Chaleur de combustion des gaz qui s'échappent du gueulard des hauts fourneaux; t. II, p. 249.
— Chaleur de combustion des gaz qui traversent les hauts fourneaux, pris à diverses hauteurs; t. II, p. 376.
— Chaleur de combustion des gaz qui proviennent des hauts fourneaux marchant au charbon de bois; t. II, p. 440.
— Théorie de la combustion des foyers des machines locomotives; t. II, p. 698.

CORINDON.
— Sa reproduction artificielle sous forme cristalline, au moyen du borax en fusion à une température élevée; t. I, p. 154 et 187.
— Conditions nécessaires pour que l'alumine cristallise hors de combinaison; t. I, p. 193.

COURBES.
— Représentant la composition des gaz en contact à différentes profondeurs des hauts fourneaux, avec les minerais à réduire; t. II, p. 362.

COUVERTE.
— Glaçure appliquée sur les porcelaines qu'on fabrique en Chine; t. I, p. 372.
— Glaçures colorées employées à la Chine pour la fabrication et la décoration de la porcelaine; t. I, p. 436.

CRISTALLISATION.
— Nouvelle méthode pour obtenir, par voie sèche, les matières minérales cristallisées; t. I, p. 125, 158, 201 et 210.

CUBILOTS.
— Analyse des gaz qui se produisent dans les cubilots; t. II, p. 387.

CUIVRE GRIS.
— De Mouzaïa, son analyse; t. I, p. 312.
— Sa composition; t. I, p. 317.

CYMOPHANE.
— Sa reproduction artificielle au moyen de l'acide borique et d'une température élevée; t. I, p. 135.
— Sa forme cristalline; p. 136.
— Son analyse; p. 137.
— Sa reproduction artificielle au moyen du borate de chaux et d'une haute température; t. I, p. 165.
— Sa coloration en vert par l'oxyde de chrome; t. I, p. 168.

D.

DÉLAYANTS.
— Employés, en Chine, pour la décoration de la porcelaine; t. I, p. 427.

DOLOMIE.
— De Bucey-les-Gy, son analyse; t. I, p. 305.

DISTILLATION.
— Du bois dans le haut fourneau; t. II, p. 163 et 172.
— De la sciure de bois en mélange avec la chaux vive; t. II, p. 101.

DYSLUITE.
— Sa composition comparée à celle des aluminates artificiels; t. I, p. 140.

E.

EAUX.
— De lessivage des houilles fermentées, leur analyse; t. I, p. 261.
— D'un puits de Bordeaux; t. I, p. 345.
— D'un puits de Vesoul; t. I, p. 344.
— Sa condensation dans le résidu fixe de l'altération des roches; t. II, p. 40.

ÉMAUX.
— Analyse de quelques émaux; t. I, p. 424.
— Leur comparaison avec les couleurs employées, en Chine, à la décoration des porcelaines; t. I, p. 425.
— Émail appliqué sur le fer (fer contre-oxydé); t. I, p. 585.

ÉMERAUDE.
— Cristallisée au milieu de l'acide borique fondu; t. I, p. 152.

PRIT-DE-BOIS.
— Son action sur l'acide borique anhydre; t. I, p. 70.
— Son action sur le chlorure de silicium; t. I, p. 89.
— Son action sur le chlorure de bore; t. I, p. 110.

HERS BORIQUES.
— Leur préparation, leur composition, leurs propriétés; t. I, p. 62.
Voir *Borates*.

HERS SILICIQUES.
— Leur préparation, leur composition, leurs propriétés; t. I, p. 76.
Voir *Silicates*.

HER SULFUREUX.
— Sa préparation; t. I, p. 118.
— Sa composition; t. I, p. 119.
— Sa densité de vapeur; t. I, p. 120.
— Action du chlore sur l'éther sulfureux; t. I, p. 121.

F.

N-HONG.
— Colcothar ou oxyde de fer rouge employé, en Chine, à la décoration des porcelaines; t. I, p. 383.

R.
— Essais pour le séparer de l'arsenic; t. I, p. 245.
— Contre-oxydé, de M. Pâris; t. I, p. 585.
— Procédés pour le fabriquer, par M. Sire; t. II, p. 541.

R CHROMÉ.
— Sa reproduction artificielle; t. I, p. 142.

RRITE DE ZINC.
— Sa préparation au moyen de l'acide borique en fusion à une température élevée; t. I, p. 172.

YERS FUMIVORES.
— Disposition nouvelle; t. II, p. 596.

AISIL.
— Sa transformation en combustible gazeux; t. II, p. 470.

ANKLINITE.
— Sa comparaison avec les spinelles et le ferrite de zinc; t. I, p. 172.

G.

GAHNITE.
— Aluminate de zinc, sa préparation artificielle; t. I, p. 164.
GANGUES.
— Influence de leur nature chimique sur la vitesse de réduction des minerais de fer; t. II, p. 218.
GAZ.
— Composition des gaz dégagés pendant la carbonisation du bois en meules; t. II, p. 109.
— Composition des gaz dégagés pendant la carbonisation du bois en vases clos, t. II, p. 115.
— Composition des gaz qui se dégagent des fours à coke; t. II, p. 149.
— Composition des gaz qui s'échappent du gueulard des hauts fourneaux; t. II, p. 226.
— Composition des gaz pris à diverses hauteurs dans les hauts fourneaux; t. II, p. 274, 296, 339, 345, 398, 417, 425, 405, 407, 425.
— Composition des gaz des hauts fourneaux représentée par des courbes; t. II, p. 362.
— Composition des gaz qui se produisent dans les cubilots; t. II, p. 387.
— Emploi, comme combustible, des gaz provenant des hauts fourneaux au charbon de bois; t. II, p. 440.
— Emploi des gaz provenant de la combustion du charbon; t. II, p. 451.
— Emploi des gaz qui proviennent des hauts fourneaux qui marchent au coke; t. II, p. 457.
— Composition des gaz provenant de la transformation en combustible de la braise et du fraisil tamisés; t. II, p. 470.
— Composition des gaz qui se produisent dans les feux d'affinerie pendant le forgeage du fer; t. II, p. 558.
— Composition des gaz qui se produisent dans les feux d'affinerie pendant le travail de la pièce; t. II, p. 562.
— Composition des gaz des fours de tôlerie; t. II, p. 575.
— Composition des gaz des fours de petit étirage; t. II, p. 577.
— Composition des gaz qui se dégagent des cheminées des fours à puddler; t. II, p. 583.
— Composition des gaz qui se dégagent des cheminées des fours à réchauffer; t. II, p. 589.

GAZ.
— Composition des gaz qui se dégagent des foyers des machines locomotives; t. II, p. 598.

GAZ OLÉFIANT.
— Sa préparation au moyen de la réaction de l'acide borique anhydre sur l'alcool absolu; t. I, p. 69.

GÉLATINE.
— Employée comme délayant dans la décoration de la porcelaine de Chine; t. I, p. 427.

GÉNÉRATEURS DE GAZ.
— À grille; t. II, p. 451.
— A cuve; t. II, p. 467.
— A combustion ordinaire; t. II, p. 467.
— A combustion renversée; t. II, p. 495.
— De Pont-l'Évêque; t. II, p. 514.
— D'Audincourt; t. II, p. 533.
— De Bourguignon; t. II, p. 524.

GLUCINE.
— Sa cristallisation au moyen du silicate de potasse en fusion; t. I, p. 207.
— Sa forme cristalline; t. I, p. 208.
— Sa formule comparée à celle de l'alumine; t. I, p. 209.
— Sa combinaison avec l'alumine; t. I, p. 135.
— Sa préparation sous forme cristalline; t. I, p. 165.

GRENAT MÉLANITE.
— De Beaujeux, sa composition; t. II, p. 16.
— Produits de son altération spontanée; t. II, p. 18.

GRÈS.
— Produits céramiques en grès commun exposés à Londres, en 1851; t. I, p. 483.
— Produits céramiques en grès fin exposés à Londres, en 1851; t. I, p. 482.

GYPSES.
— Du trias, leur altération sous l'influence des eaux d'infiltration; t. II, p. 81.
— Tertiaires du terrain de Paris, leur altération sous l'influence des eaux d'infiltration; t. II, p. 90.

H.

HAUTS FOURNEAUX.
— Forme et dimensions du haut fourneau de Vellexon, au mois de décembre 1837; t. II, p. 159.
— Forme et dimensions du haut fourneau de Clerval, au mois de juin 1839; t. II, p. 271; en octobre 1848; t. II, p. 417.
— Forme et dimensions du haut fourneau d'Audincourt, au mois d'octobre 1841; t. II, p. 291.
— Théorie de ces appareils; t. II, p. 318, 400, 409 et 433.
— Effet de l'air chaud sur la marche de ces appareils; t. II, p. 330.
— Effet de la vapeur d'eau sur la marche de ces appareils; t. II, p. 333.
— Dimensions du haut fourneau de Vienne, en septembre 1843; t. II, p. 338.
— Dimensions du haut fourneau de Pont-l'Évêque; t. II, p. 344.
— Température de ces appareils en différents points de leur hauteur; t. II, p. 351.
— Dimensions du haut fourneau de Weckeragen; t. II, p. 396.
— Dimensions du haut fourneau de Barum; t. II, p. 405.
— Dimensions du haut fourneau d'Alfreton; t. II, p. 409.
— Dimensions du haut fourneau de Seraing; t. II, p. 425.
— De M. Sire; t. II, p. 541.

HERCINITE.
— Sa reproduction artificielle; t. I, p. 139.

HOA-CHY.
— Employé en Chine à la fabrication de la porcelaine; diverses variétés; t. I, p. 360.

HOUILLE.
— Sa carbonisation dans les fours à coke; t. II, p. 144.

HOUILLES PYRITEUSES.
— Produits de leur altération spontanée; t. I, p. 259.

HUILE DE POMME DE TERRE.
— Son action sur l'acide borique anhydre; t. I, p. 71.
— Son action sur le chlorure de silicium; t. I, p. 87.
— Son action sur le chlorure de bore; t. I, p. 113.

HYALITE ARTIFICIELLE.
— Sa préparation au moyen des éthers siliciques; t. I, p. 90.

HYDRATE SILICIQUE.
— Sa préparation; t. I, p. 90.
— Sa composition; t. I, p. 94.

HYDROGÈNE SULFURÉ.
— Nouveau mode d'emploi de ce gaz dans l'analyse chimique; t. I, p. 239.
— Essais pour constater sa présence dans les gaz des hauts fourneaux; t. II, p. 349.
— Sa présence dans les combustibles gazeux provenant du coke; t. II, p. 517.

HYDROPHANE.
— Sa préparation; t. I, p. 95.

J.

JAUNE.
— Couleur jaune de moufle employée, en Chine, à la décoration de la porcelaine; t. I, p. 410.
— Couleur jaune de demi-grand fe uemployée, en Chine, à la décoration de la porcelaine; t. I, p. 434.

K.

KAOLIN.
— Employé, en Chine, pour la fabrication de la porcelaine : kaolins de Sy-kang et de Tong-kang; leur analyse; t. I, p. 351.

KAOLINISATION.
— Ses rapports avec l'altération spontanée des silicates alumineux et des roches en général; t. II, p. 41.

KUPFERNICKEL.
— D'Ayer, son analyse; t. I, p. 319.

L.

LAQUE.
Couleur brun-laque de grand feu employée, en Chine, à la décoration de la porcelaine; t. I, p. 449.

LOCOMOTIVES.
— Composition des gaz qui se dégagent des foyers de ces appareils; t. II, p. 498.

M.

MAGNÉSIE.
— Sa combinaison avec l'alumine; t. I, p. 135 et 161.
— Sa combinaison avec la silice, protosilicate de magnésie; t. I, p. 152.
— Sa combinaison avec la silice, bisilicate de magnésie; t. I, p. 183.
— Sa combinaison avec l'acide borique; t. I, p. 175.
— Sa cristallisation à l'état de pureté, par précipitation par voie sèche; t. I, p. 212.
— Sa combinaison avec l'oxyde de chrome; t. I, p. 148.
— Moyen de la séparer des alcalis; t. I, p. 249.

MARCELINE.
— Sa composition et sa comparaison avec les produits de l'altération spontanée du silicate de manganèse; t. II, p. 11.

MATIÈRES ORGANIQUES.
— Leur rôle dans l'altération spontanée des roches et des silicates; t. II, p. 43.

MÉTAMORPHISME.
— Rapport de ces phénomènes avec la précipitation par voie sèche; t. I, p. 223.

MINERAIS DE FER.
— Analyses de vingt-cinq variétés de minerais de fer; t. I, p. 284 à 303.
— Leur réduction dans les hauts fourneaux; t. II, p. 185.
— Théorie de leur réduction déduite de la composition des gaz pris à diverses hauteurs dans les hauts fourneaux; t. II, p. 318.

MINERAIS DE MANGANÈSE.
— Première méthode de les analyser; t. I, p. 227.
— Seconde méthode de les analyser; t. I, p. 229.
— Leur emploi pour déterminer la quantité d'oxygène absorbée par certaines substances en se dissolvant dans les acides oxydants; t. I, p. 233.
— Analyse de quelques minerais de manganèse; t. I, p. 267.
— Parti qu'on peut tirer, dans les arts, des résidus de la préparation du chlore.

MINÉRAUX ALCALIFÈRES.
— Moyens de les analyser quand ils renferment de la magnésie; t. I, p. 253.

N.

NIOBATE DE CHAUX.
— Essais pour le préparer sous forme de cristaux; t. I, p. 221.

NITRATE D'URANE.
— Sa préparation et son analyse; t. I, p. 25.

NITRIFICATION.
— Influence des phénomènes de la nitrification sur l'altération spontanée des roches ignées; t. II, p. 44.

NOIRS.
— Couleur noire de moufle employée, en Chine, à la décoration de la porcelaine; t. I, p. 397.
— Couleur noire de grand feu employée, en Chine, à la décoration de la porcelaine; t. I, p. 452.

NONTRONITE.
— Provenant de l'altération d'un basalte; t. II., p. 37.

O.

OR.
— Son emploi dans la décoration de la porcelaine, en Chine; t. I, p. 426.

OXALATE DOUBLE D'URANE ET DE POTASSE; t. I, p. 14.
— Sesquibasique; t. I, p. 18.

OXALATE D'URANE.
— Ses propriétés; t. I, p. 3.

OXYDE DE CARBONE.
— Sa chaleur de combustion; t. II, p. 156.

OXYDE DE CHROME.
— Cristallisé au sein du borate de chaux; t. I, p. 150.
— Sa combinaison avec l'alumine et l'oxyde de fer; t. I, p. 144.
— Sa combinaison avec l'oxyde de fer; t. I, p. 146.
— Sa combinaison avec l'oxyde de manganèse; t. I, p. 150.
Sa combinaison avec la magnésie; t. I, p. 148.
Sa combinaison avec l'oxyde de zinc, sa préparation; t. I, p. 170.
— Sa combinaison avec l'acide borique et la magnésie (*oxyde de chrome magnéso-boraté*); t. I, p. 176.

OXYDE DE COBALT.
— Essais pour séparer le fer et le cobalt par l'hydrogène sulfuré; t. I, p. 244.
— Employé, en Chine, pour la décoration de la porcelaine (*Thsing-hoa-liao*); t. I, p. 385.
— Sa préparation sous forme de cristaux; t. I, p. 216.
— Sa combinaison avec l'alumine, ses propriétés; t. I, p. 140.

OXYDE DE FER.
— Sesquioxyde, sa préparation en combinaison avec l'oxyde de zinc; t. I, p. 172.
— Sa combinaison avec l'acide borique et la magnésie (*peroxyde de fer magnéso-boraté*); t. I, p. 178.
— Essais pour le séparer de l'arsenic; t. I, p. 245.
— Anhydre, sa cristallisation par voie sèche, t. I, p. 216.
— Oxydulé magnétique précipité du silicate de fer par voie sèche; t. I, p. 216.
— Hydraté, sa formation pendant l'altération spontanée des roches ferrugineuses; t. II, p. 45.

OXYDE DE FER MAGNÉTIQUE.
— Essais pour le reproduire sous forme de cristaux; t. I, p. 217.
— Moyen de le séparer de l'oxyde de cobalt; t. I, p. 240.
— Moyen de le séparer de l'oxyde de manganèse; t. I, p. 240.
— Moyen de le séparer de l'oxyde de nickel; t. I, p. 243.

OXYDE DE MANGANÈSE.
— Sa combinaison avec l'alumine, essai pour la préparer; t. I, p. 139 et 160.
— Sa combinaison avec l'oxyde de chrome, ses propriétés; t. I, p. 159.
— Essais pour le préparer sous forme de cristaux; t. I, p. 216.
— Son dosage dans les analyses chimiques; t. I, p. 238.
— Braunite, provenant de l'altération spontanée du silicate de manganèse; t. II, p. 11.
— Deutoxyde, provenant de l'altération spontanée des roches manganésifères; t. II, p. 45.

OXYDE DE NICKEL.
— Sa préparation sous forme de cristaux; t. I, p. 215.
— Moyen de le séparer de l'oxyde de manganèse; t. I, p. 243.

OXYDE DE ZINC.
— Sa combinaison avec la silice, essais pour la préparer; t. I, p. 186.

XYDE DE ZINC.
— Sa combinaison avec l'alumine; t. I, p. 162.
— Essais pour le séparer de l'oxyde de manganèse, au moyen de l'hydrogène sulfuré à une température élevée; t. I, p. 244.
— Cadmie de Treveray (Meuse), son analyse; t. I, p. 304.

XYDE VERT D'URANE.
— Ses propriétés; t. I, p. 9.

XYDE URANIQUE.
— Ses propriétés; t. I, p. 11.

XYDULE DE FER.
— Sa préparation sous forme de cristaux, par précipitation par voie sèche; t. I, p. 216.

XYGÈNE.
— Détermination de la quantité d'oxygène qu'absorbent certaines substances en se dissolvant dans les acides oxydants; t. I, p. 232.
— Son rôle avec le concours de l'acide carbonique dans l'altération spontanée des roches; t. II, p. 42.
— Sa proportion augmentée dans l'air par suite de la formation de la pyrite; t. II, p. 50.
— Sa proportion diminuée par suite de l'altération de la pyrite; t. II, p. 53.
— Recherche de sa présence dans les gaz qui se dégagent des hauts fourneaux; t. II, p. 236.

P.

TES DE PORCELAINE.
— De Chine de première qualité; t. I, p. 335.
— De Chine de deuxième qualité; t. I, p. 367.
— De Chine de troisième qualité; t. I, p. 368.
— De Chine de quatrième qualité; t. I, p. 369.

CHBLENDE.
— Sa composition chimique; t. I, p. 41.
— Sa nature; t. I, p. 46.

RIDOT.
— Sa production artificielle sous forme cristalline au milieu de l'acide borique en fusion; t. I, p. 152.
— Sa cristallisation; t. I, p. 181 et 203.
— Sa forme cristalline; t. I, p. 182.

PÉRIDOT BLANC DU VÉSUVE.
— Son analogie avec le silicate de magnésie artificiel; t. I, p. 200.
— Analyse d'un péridot trouvé dans le haut fourneau de Seveux; t. I, p. 258.

PÉRIKLASE.
— Ses propriétés, sa comparaison avec la magnésie préparée artificiellement; t. I, p. 214.

PÉROWSKITE.
— Sa reproduction artificielle par la fusion de la chaux et de l'acide titanique dans du silicate alcalin; t. I, p. 205.
— Nouvelle méthode pour la préparer; t. I, p. 219.

PÉTROSILEX.
— Employés à la fabrication de la porcelaine, en Chine; t. I, p. 354.

PÉTUNTSÉ.
— Employé dans la fabrication de la porcelaine en Chine, ses diverses provenances, sa composition; t. I, p. 354.

PINCEAUX.
— Employés à la décoration de la porcelaine en Chine; t. I, p. 428.

POTERIES.
— Perfectionnements apportés dans la fabrication des poteries depuis 1808 jusqu'à nos jours; t. I, p. 531.
— Perfectionnements apportés dans la décoration des poteries depuis 1808 jusqu'à nos jours; t. I, p. 551.
— Décorées au moyen de marbrures; t. I, p. 583.

PORCELAINES.
— Procédés employés, en Chine, pour fabriquer la porcelaine; t. I, p. 437.
— Procédés employés, en Chine, pour décorer la porcelaine; t. I, p. 377 et 431.
— Porcelaine dure exposée à Londres, en 1851; t. I, p. 436.
— Porcelaine tendre, française, exposée à Londres, en 1851; t. I, p. 475.
— Porcelaine tendre, anglaise, exposée à Londres, en 1851; t. I, p. 476.
— Porcelaine cuite à la houille; t. I, p. 575.
Porcelaine dorée par un nouveau procédé; t. I, p. 584.

PLATINE.
— Sa cristallisation au milieu du silicate alcalin; t. I, p. 210.
— Sa présence dans certains minerais du département de l'Isère; t. I, p. 320.

PLÉONASTE.
— Sa reproduction artificielle au moyen de l'acide borique et d'une température élevée; t. I, p. 128.

PLOMB.
— Son oxydation en présence du bois de chêne humide; t. I, p. 326.

PYRITE.
— Son action sur la quantité d'oxygène que renferme l'air atmosphérique, dégagement d'oxygène pour sa formation; t. II, p. 50.
— Absorption d'oxygène pendant son altération spontanée; t. II, p. 53.

PYROCHLORE.
— Essais pour le préparer artificiellement; t. I, p. 221.

R.

RÉDUCTION.
— Des minerais de fer dans les hauts fourneaux; t. II, p. 185.
— Influence des gangues sur ce phénomène; t. II, p. 218.
— Influence du combustible sur ce phénomène; t. II, p. 221.

RHODONITE.
— Bisilicate de manganèse, sa composition; t. II, p. 7.
— Produits de son altération; t. II, p. 7 et 8.

ROUGES.
— Couleur rouge de moufle employée, en Chine, à la décoration de la porcelaine; t. I, p. 412.
— Couleur rouge de grand feu employée, en Chine, à la décoration de la porcelaine; t. I, p. 437.
— Rouge soufflé; t. I, p. 454.

RUTILE.
— Sa reproduction artificielle au milieu du silicate de soude et de fer; t. I, p. 206.

S

SÉLÉNIUM.
— Moyen d'en reconnaître la présence dans le soufre : t. I. p. 22

SILICATE AMYLIQUE.
— Protosilicate, sa préparation : t. I. p. 87.
— Son analyse : t. I. p. 88.
— Sa densité de vapeur : t. I. p. 89.

SILICATES DE MAGNÉSIE.
— Sa préparation artificielle au moyen de l'action de l'acide et du température élevée : t. I. p. 152.
— Sa forme cristalline : t. I. p. 182 et 203.
— Bisilicate, sa préparation : t. I. p. 183.
— Sa forme cristalline : t. I. p. 184.

SILICATE DE MANGANÈSE (RHODONITE).
— D'Alger, bisilicate, produits de son altération : t. II. p. 7.

SILICATE DE PEROXYDE DE FER ET DE CHAUX (GRENAT MÉLANITE)
— Sa composition : t. II. p. 16.
— Produits de son altération spontanée : t. II. p. 18.

SILICATE DOUBLE DE CHAUX ET DE MANGANÈSE (BUSTAMITE)
— Sa composition : t. II. p. 13.
— Produits de son altération spontanée : t. II. p. 14.

SILICATE D'OXYDE DE ZINC.
— Essais pour le préparer par voie sèche : t. I. p. 186.

SILICATES ÉTHYLIQUES.
— Protosilicate : t. I. p. 76.
— Sa préparation : t. I. p. 77.
— Son analyse : t. I. p. 78.
— Sa densité de vapeur : t. I. p. 79.
Bisilicate, sa préparation : t. I. p. 81.
— Sa composition : t. I. p. 83.
— Quadrisilicate : t. I. p. 84.

SILICATES MÉTHYLIQUES.
Essais pour les préparer : t. I. p. 89.

SILICATES NATURELS.
Leur décomposition : t. II. p. 5.

SOUFRE.
— Moyen de reconnaître s'il renferme du sélénium; t. I, p. 226.
— Son emploi pour analyser les minerais de manganèse; t. I, p. 229.
— Essai pour constater sa présence dans les gaz des hauts fourneaux; t. II, p. 349.

SPINELLE.
— Rose, sa préparation, sa composition; t. I, p. 128.
— Bleu, sa préparation; t. I, p. 132.
— Bleu, sa composition; t. I, p. 133.
— Noir, sa préparation; t. I, p. 134.
— Incolore, sa préparation et ses propriétés; t. I, p. 135.

SULFATE DE CHAUX.
— Employé, en Chine, à la fabrication de la porcelaine; t. I, p. 374.
— Résultant de l'altération des calcaires pyriteux; t. II, p. 96.

SULFATE DE FER.
— Basique, son analyse et son gisement; t. I, p. 257.

SULFATE DE SESQUIOXYDE DE TITANE.
— Ses propriétés; t. I, p. 56.

SULFATE DOUBLE D'URANE ET D'AMMONIAQUE.
— Ses propriétés; t. I, p. 25.

SULFATE URANEUX.
— Sa préparation et son analyse; t. I, p. 31.
— Bibasique, ses propriétés; t. I, p. 34.

SULFATE URANIQUE.
— Ses propriétés; t. I, p. 25.

SULFITE D'ÉTHYLE.
— Sa préparation; t. I, p. 118.
— Son analyse; t. I, p. 119.
— Sa densité de vapeur; t. I, p. 120.
— Action du chlore sur l'éther sulfureux; t. I, p. 121.

SULFURE DE TITANE.
Bisulfure, ses propriétés, sa composition; t. I, p. 57.

SULFURE DE FER.
— Origine de la coloration bleu clair de certains calcaires; t. II, p. 99.

SY-CHY-MO.
— Sable employé, en Chine, dans la fabrication des couleurs qu'on applique sur porcelaine; t. I, p. 382.

T.

TANTALATE DE CHAUX.
— Essai pour le préparer sous forme de cristaux: t. I, p. 221.

TERRAINS CALCAIRES.
— Leur altération sous l'influence des eaux d'infiltration; t. II, p. 93.

TERRAINS GYPSEUX.
— Leur altération sous l'influence des eaux d'infiltration; t. II, p. 81.

TERRAINS IGNÉS.
— Comparaison de leur composition avec celle des terrains stratifiés; t. II, p. 2.
— Considérations sur la nature des produits de leur altération spontanée; t. II, p. 45.

TERRAINS STRATIFIÉS.
— Leur origine attribuée à l'altération spontanée des roches ignées: t. II, p. 45.
Leur altération par les agents atmosphériques et les eaux d'infiltration; t. II, p. 79.

TITANATE DE CHAUX.
— Sa préparation, sa cristallisation, son analyse; t. I, p. 205.
— Nouvelle méthode pour le préparer, sa comparaison avec la pérowskite; t. I, p. 219.

TITANE.
Sesquichlorure de titane; t. I, p. 49.
Sesquioxyde de titane; t. I, p. 55.
— Titane métallique, sa préparation; t. I, p. 54.
— Son poids atomique; t. I, p. 60.
— Protochlorure de titane, sa préparation; t. I, p. 54.
— Sulfate de sesquioxyde de titane, ses propriétés; t. I, p. 56.
— Sulfure de titane (bisulfure), ses propriétés, son analyse; t. I, p. 57.

TOURBE.
Sa transformation en combustible gazeux; t. II, p. 490.

TRAPP.
— De Saint-Austell, sa composition; t. II, p. 57.
— Produits de son altération spontanée; t. II, p. 60 et 61.

TUNGSTATE DE FER ET DE MANGANÈSE.
— Sa composition; t. I, p. 308.

U.

URANE.
— Recherches sur quelques composés de l'urane; t. I, p. 1.
— Son poids atomique; t. I, p. 9.
— Son dosage; t. I, p. 36.
— Oxalate uranique, sa préparation; t. I, p. 3.
— Sa composition; t. I, p. 5.
— Oxyde vert d'urane, sa composition; t. I, p. 9.
— Oxyde uranique, sa préparation; t. I, p. 11.
— Sa composition, t. I, p. 12.
— Oxalate double d'urane et de potasse, sa forme cristalline; t. I, p. 15.
— Sa composition; t. I, p. 16.
— Oxalate double d'urane et de potasse sesquibasique, ses propriétés; t. I, p. 18.
— Carbonate double d'urane et de potasse, ses propriétés; t. II, p. 19.
— Carbonate double d'urane et d'ammoniaque, ses propriétés; t. I, p. 21.
— Nitrate d'urane, sa préparation et son analyse; t. I, p. 25.
— Sulfate uranique, ses propriétés; t. I, p. 25.
— Sulfate double d'urane et d'ammoniaque, ses propriétés; t. I, p. 27.
— Sulfate uraneux, sa préparation; t. I, p. 31.
— Sa composition; t. I, p. 32.
— Sulfate uraneux bibasique, ses propriétés; t. I, p. 34.
— Composition chimique de la pechblende; t. I, p. 41.

V.

VAPEUR D'EAU.
— Son effet sur la marche des hauts fourneaux; t. II, p. 333.
— Son effet sur la marche des générateurs de gaz combustibles; t. II, p. 455.
Son emploi dans la transformation du fraisil en combustible gazeux; t. II, p. 477.

VERT.
Couleur verte de moufle employée, en Chine, à la décoration de la porcelaine; t. I, p. 403.
Couleur verte de demi-grand feu employée, en Chine, à la décoration de la porcelaine; t. I, p. 434.
— Couleur verte au grand feu (*céladon*) employée à la décoration de la porcelaine chinoise; t. I, p. 444.
— Couleur vert-olive de grand feu employée, en Chine, à la décoration de la porcelaine; t. I, p. 448.

VILLEMITE.
— Sa comparaison avec le silicate de zinc préparé artificiellement par fusion dans l'acide borique anhydre; t. I, p. 87.

VIOLET.
— Couleur violette de demi-grand feu employée, en Chine, à la décoration de la porcelaine; t. I, p. 434.

W.

WOLFRAM.
— Analyse du wolfram de Limoges; t. I, p. 308.
— Analyse du wolfram de Zinnwald; t. I, p. 309.
— Constitution chimique de ces deux minéraux; t. I, p. 310.